



INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT
ΕΙΝ ἈΓΡΟΕΠΙΛΙΒΟΙΗΜΕΝΕΙ
ET DE DÉVELOPPEMENT

RAPPORT FINAL

SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES SÉDIMENTS ET DES NUTRIMENTS DES BASSINS VERSANTS DE LA MRC DE LA HAUTE-YAMASKA



Responsable scientifique : Aubert Michaud, Phd

Chercheur, Institut de recherche et développement en agroenvironnement

Rapport présenté à l'OBV Yamaska, la Ville de Granby et la MRC de La Haute-Yamaska

Date : 29 mars 2021



PARTENAIRES



SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES SÉDIMENTS ET DES NUTRIMENTS DES BASSINS VERSANTS DE LA MRC DE LA HAUTE-YAMASKA

Rapport final

Présenté à :

Ville de Granby

MRC de La Haute-Yamaska

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Aubert R. Michaud, Ph. D., IRDA
- Mohamed Abou Niang, IRDA
- Arianne Blais-Gagnon, IRDA
- William Huertas, IRDA
- Colline Gombault, IRDA
- Geneviève Labrie, OBV Yamaska
- Michel Landry, OBV Yamaska

COLLABORATEURS

- Alex Martin, OBV Yamaska
- Laurianne Levert-Gauthier, club conseil Gestrie-Sol

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Michaud, A.R., M.A. Niang, A. Blais-Gagnon, W. Huertas, C. Gombault, G. Labrie et M. Landry. 2020. Suivi hydrométrique et modélisation hydrologique des sédiments et des nutriments des bassins versants de la MRC de La Haute-Yamaska. Rapport final. IRDA et OBV Yamaska. 85 pages plus Annexes.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

RÉSUMÉ

Cette étude présente une synthèse des résultats scientifiques produits entre 2016 et 2020 portant sur la caractérisation de la qualité de l'eau des principaux affluents du Lac Boivin, de même que sur l'analyse de la vulnérabilité du territoire de l'ensemble de la MRC de la Haute-Yamaska aux exportations de sédiments et de phosphore. Suivant un premier mandat octroyé par la Ville de Granby en 2016, ciblé sur le Lac Boivin et son bassin versant, l'étude a été étendue à l'ensemble du territoire de la MRC de la Yamaska dans le cadre de la mise en œuvre de son plan directeur de l'eau. L'objectif principal de l'étude consistait à cerner les portions du territoire les vulnérables aux pertes de sol et de nutriments afin d'accompagner les producteurs agricoles dans des actions prévenant l'érosion des terres et la perte de phosphore et d'azote dans les cours d'eau. L'étude réalisée comprend deux volets, soit un volet d'étude hydrométrique ciblé sur l'observation des trois principaux affluents du Lac Boivin, et un volet d'étude en modélisation hydrologique, ciblée sur la caractérisation de la vulnérabilité du bassin versant aux émissions de phosphore.

Le volet d'étude hydrométrique a porté sur la rivière Yamaska Nord (185 km²) et le ruisseau Ostiguy (37 km²) pour la période 2016-2018, alors que l'étude du ruisseau Bouchard (10 km²) couvre la période 2016-2020. Les dispositifs en place ont permis de mesurer en continu les débits des trois cours d'eau, de même que leurs apports respectifs de sédiments et de nutriments au Lac Boivin. Sur une base annuelle, les charges spécifiques de sédiments (exprimées sur la base de la superficie du bassin versant) ont été estimées à 66 kg MES/ha, 81 kg MES/ha et 117 kg MES/ha, respectivement, pour les bassins Yamaska Nord, Ostiguy et Bouchard. Ces taux relativement bas, comparés aux taux d'exportation mesurés dans d'autres micro-bassins versants de la Montérégie à vocation agricole, s'expliquent par la prédominance de l'occupation forestière du territoire et l'importance des superficies en culture dédiées aux fourrages pérennes. Au global, la charge de sédiments apportée au lac Boivin est de l'ordre de 1 350 tonnes par année.

La charge annuelle estimée de phosphore total au lac Boivin se situe pour sa part à 8,52 tonnes par an. La charge spécifique du ruisseau Bouchard, exprimée par rapport à la superficie du bassin, est de 0,92 kg P/ha-an, soit près du double de celles estimées pour la Yamaska Nord (0,41 kg P/ha-an) et Ostiguy (0,51 kg P/ha-an). L'exportation spécifique de phosphore (P) plus élevée pour le ruisseau Bouchard est associée à l'occupation agricole du sol relativement plus importante de son bassin versant et la position plus basse occupée par le bassin dans le paysage, favorisant l'émission du ruissellement de surface. Les gradients significatifs observés pour les formes solubles et réactives de P entre les périodes d'échantillonnage 2016-2018 et 2019-2020, de même qu'entre les quatre stations d'échantillonnage des branches du ruisseau indique que l'enrichissement de ce dernier en phosphore est plutôt redevable aux sources de phosphore (richesse des sols et apports de P), qu'au processus d'érosion des sols.

Les charges annuelles spécifiques de nitrates ont été estimées à 3,3 kg N/ha et 3,5 kg N/ha aux bassins Ostiguy et Yamaska Nord, respectivement, contre 5,0 kg N/ha-an au bassin Bouchard. Ces flux de nitrates relativement peu élevés, en comparaison d'autres bassins documentés en Montérégie, sont redevables à l'importante occupation forestière des territoires des trois bassins versants à l'étude. Le maintien des concentrations en nitrates dans les cours d'eau en période hivernale indique cependant qu'un stock non négligeable d'azote demeure disponible en fin de saison de croissance des cultures. Ces reliquats de fertilisation azotée seraient mobilisés graduellement en période de recharge de la nappe au cours de la saison morte. Cette observation traduit des gains potentiels à réaliser en matière de rationalisation de la fertilisation azotée des cultures.

Le deuxième volet d'étude, dédié à la modélisation hydrologique, a permis de projeter la vulnérabilité du bassin versant du lac Boivin, de même que de l'ensemble du territoire de la MRC de La Haute-Yamaska, aux exportations de sédiments et de phosphore. L'outil de diagnostic spatialisé des exportations de phosphore (GéODEP) a été mis à profit pour cet exercice de représentation du risque d'érosion hydrique et d'exportation de phosphore. L'outil permet de localiser les secteurs en culture les plus vulnérables aux pertes de sol et de phosphore, puis offre

la possibilité d'évaluer différents scénarios d'intervention sur le devenir des charges de sédiments et de P émises. L'étude offre également une représentation du risque d'érosion et de perte de phosphore pour les occupations non agricoles du territoire. L'ensemble des données à référence spatiale utilisées en support à la modélisation, de même que les résultats représentatifs du portrait actuel de l'occupation du territoire sont intégrés dans un système géographique à haute résolution (1 m) et mis à la disposition des promoteurs du projet.

Globalement, à l'échelle du territoire de la MRC, les projections de hauteurs de ruissellement, de pertes de sol et de charges de phosphore ont été estimées pour plus de 50 000 unités de calcul. La répartition des indices par classe d'occupation du territoire attribue 57 % de la charge totale de phosphore au lac Boivin à l'occupation agricole du territoire, qui occupe 25 % de la superficie du bassin versant. Les milieux naturels, incluant l'occupation forestière, les friches et les milieux humides (63 % de la superficie) et le milieu développé (12 % de la superficie) sont associés, respectivement, à 21 % et 22 % des charges de P. En territoire agricole, les indices GéODEP estimés pour les différentes classes de culture mettent en relief des vulnérabilités contrastées du parcellaire aux exportations de phosphore. À l'échelle du bassin versant du lac Boivin, par exemple, le taux d'exportation moyen de P total passe de 2,64 kg P/ha-an pour les superficies en soya, à 0,74 kg P/ha-an pour la prairie. La variabilité des propriétés des sols et du relief à l'échelle du bassin contribue aussi expliquer la forte discrimination spatiale des exportations projetées de phosphore. Par exemple, la moyenne des pertes annuelles de P projetées pour la culture de maïs dans le bassin de la rivière Yamaska Nord (1,89 kg P/ha) est 60% plus élevée que celle du bassin du ruisseau Ostiguy (1,18 kg/P-ha-an), en raison de l'érosivité du relief.

Toutes proportions gardées, les charges annuelles spécifiques (par unité de surface) de sédiments (491 kg MES/ha) et de phosphore (0,96 kg P/ha) au lac Boivin demeurent en deçà de celles documentées pour d'autres secteurs des bassins versants des rivières Yamaska et Richelieu en Montérégie. Cette pression environnementale modérée tient en bonne partie à la vocation forestière dominante du bassin versant et à des systèmes culturels dominés par les prairies. Ce constat est en soi un important actif pour la mise en valeur du lac Boivin et les autres plans d'eau plus en amont dans le bassin versant. La charge externe de P est en effet le principal facteur déterminant du processus d'eutrophisation de ces lacs et cours d'eau.

La superposition des portraits de la qualité de l'eau (suivis hydrométriques) et de la vulnérabilité du territoire aux exportations de P (application GéODEP) réalisés dans le cadre de la présente étude met en relief deux enjeux qui interpellent particulièrement le secteur agricole. D'une part, la nature soluble du phosphore, observée particulièrement dans le ruisseau Bouchard, témoigne de gains potentiels à réaliser dans la chaîne de gestion des engrais de ferme, depuis le bâtiment d'élevage jusqu'au champ. D'autre part, le relief accidenté de secteur plus en amont du bassin versant fait en sorte que les superficies dédiées aux cultures annuelles y sont particulièrement vulnérables à l'érosion et au transport de phosphore particulaire vers les plans d'eau. Les pratiques culturales anti-érosives (cultures sur résidus et cultures de couverture) et l'aménagement hydro-agricole des terres y sont appelés à jouer un rôle important dans la préservation de la qualité des sols et des plans d'eau.

Table des matières

RÉSUMÉ	3
LISTE DES TABLEAUX	8
LISTE DES FIGURES	9
1. MISE EN CONTEXTE	11
2. PRÉSENTATION DE L'ÉQUIPE DE TRAVAIL	12
3. VOLET D'ÉTUDE HYDROMÉTRIQUE	14
3.1 OBJECTIFS	14
3.2 MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS	15
3.2.1 Description des sites d'étude	15
3.2.2 Opération des stations hydrométriques	20
3.2.3 Campagnes d'échantillonnage des cours d'eau	21
3.2.4 Résultats du suivi hydrométrique des stations principales	24
3.2.5 Résultats des campagnes d'échantillonnage spatial du ruisseau Bouchard	41
3.3 CONCLUSION DU VOLET DE SUIVI HYDROMÉTRIQUE	43
4. VOLET D'ÉTUDE EN MODÉLISATION HYDROLOGIQUE	45
OBJECTIFS	46
MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS	46
4.2.1 Paramétrage du modèle	47
4.2.2 Projections des flux de sédiments et de phosphore des sous-bassins versants du lac Boivin pour le scénario particulier	48
4.2.3 Projections des flux de sédiments et de phosphore du bassin et des sous-bassins versants du lac Boivin pour le scénario alternatif	64
4.2.4 Projections des flux de sédiments et de phosphore du territoire de la MRC de La Haute-Yamaska pour le scénario de référence	73
RÉFÉRENCES	82
ANNEXE A – DONNÉES UTILISÉES EN INTRANT DANS LA CRÉATION DES SCÉNARIOS DE GESTION DE GÉODEP	86
ANNEXE B – MÉTHODE D'ESTIMATION DE LA CHARGE DE PHOSPHORE LIÉE À LA PERTE ÉVÉNEMENTIELLE SUIVANT DES ÉPANDAGES D'ENGRAIS DE FERME NON INCORPORÉS	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Élévations et pentes des sous-bassins du lac Boivin.	7
Tableau 2.	Série, texture et qualité du drainage des sols des sous-bassins du lac Boivin.	8
Tableau 3.	Occupation du territoire des sous-bassins versants à l'étude.....	9
Tableau 4.	Description des instruments en place aux stations hydrométriques.....	10
Tableau 5.	Concentrations (conc) moyennes pondérées pour le débit et charges annuelles spécifiques (365 jrs, base ha) de calcium, de matières en suspension, d'azote et de phosphore estimées aux stations hydrométriques Yamaska Nord, Bouchard et Ostiguy	27
Tableau 6.	Spéciation des formes de phosphore estimée pour les charges des trois bassins versants étudiés. ...	27
Tableau 7.	Moyennes des concentrations (ug/L) en matières en suspension, nitrates et différentes formes de phosphore, ajustées au modèle d'analyse de la variance des observations colligées aux quatre stations d'échantillonnage spatial du ruisseau Bouchard en période de crue.....	35
Tableau 8.	Distribution des cultures et des aménagements du drainage souterrain des champs inventoriés du bassin versant du lac Boivin.....	51
Tableau 9.	Distribution des pratiques de travail du sol pour les cultures annuelles des champs inventoriés du bassin versant du lac Boivin.....	52
Tableau 10.	Distribution des richesses et saturations des sols en phosphore des champs inventoriés du bassin versant du lac Boivin.....	52
Tableau 11.	Distribution des apports de phosphore provenant d'engrais de ferme et d'engrais minéraux par classe de culture des champs inventoriés du bassin versant du lac Boivin.....	53
Tableau 12.	Bilan des apports en phosphore classe de culture des champs inventoriés du bassin versant du lac Boivin.....	54
Tableau 13.	Projections des charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol pour le bassin versant du lac Boivin et ses sous-bassins Yamaska Nord, Ostiguy et Bouchard	59
Tableau 14.	Comparaison des taux projetés par GéODEP (modélisé) aux flux mesurés d'exportation de sédiments et de phosphore pour les sous-bassins Yamaska Nord, Ostiguy et Bouchard	65
Tableau 15.	Projections des réductions de charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol pour le bassin versant du lac Boivin résultant de l'application du scénario alternatif de gestion agricole.....	68
Tableau 16.	Exportations projetées de sédiments et de phosphore par classe d'occupation des sols pour les bassins versants de la MRC de La Haute-Yamaska.....	78

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Sous-bassins versants des stations hydrométriques Ostiguy, Bouchard et Yamaska Nord (a) et localisation des stations d'échantillonnage (b).....	6
Figure 2.	Aperçu des sites des stations Bouchard (a), Ostiguy (b) et Yamaska Nord (c).....	7
Figure 3.	Installation des équipements à la station Bouchard.....	10
Figure 4.	Jaugeage de la station Ostiguy à l'hiver 2017.....	11
Figure 5.	Mesures du débit instantané, à l'aide du moulinet hydrométrique, à la station Bouchard.....	12
Figure 6.	Distribution dans le temps des débits journaliers moyens et des débits observés au moment des échantillonnages aux stations Bouchard (a), Ostiguy (b) et Yamaska Nord (c).....	14
Figure 7.	Variation du débit, de la turbidité et de la conductivité au pas de temps de 15 minutes pour la crue du 7 avril 2017 observée aux trois stations hydrométriques.....	17
Figure 8.	Séries chronologiques des débits spécifiques et des précipitations journalières observés aux trois stations pour les campagnes 2016-2017 et 2017-2018.....	19
Figure 9.	Séparation de l'écoulement de surface et souterrain pour le cours d'eau Bouchard en 2017 et 2018. .	20
Figure 10.	Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO ₃) en fonction du débit spécifique et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique du ruisseau Bouchard.....	23
Figure 11.	Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO ₃) en fonction du débit spécifique et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique du ruisseau Ostiguy.....	24
Figure 12.	Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO ₃) en fonction du débit spécifique et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique de la rivière Yamaska Nord.....	25
Figure 13.	Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, des différentes formes de phosphore et des nitrates à la station hydrométrique du ruisseau Bouchard.....	29
Figure 14.	Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, des différentes formes de phosphore et des nitrates à la station hydrométrique du ruisseau Ostiguy.....	30
Figure 15.	Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, des différentes formes de phosphore et des nitrates à la station hydrométrique de la rivière Yamaska Nord.....	31
Figure 16.	Charges et spéciation des formes de phosphore observées aux exutoires des trois bassins versants à l'étude.....	32
Figure 17.	Modèle numérique d'élévation du territoire des sous-bassins versants à l'étude.....	42
Figure 18.	Hydrographie du territoire des sous-bassins versants à l'étude.....	43
Figure 19.	Pédologie du territoire des sous-bassins versants à l'étude.....	44

Figure 20.	Occupation du territoire des sous-bassins versants à l'étude.....	45
Figure 21.	Illustration des différentes étapes de traitement des données à référence spatiale dans GÉODEP pour une portion de territoire à vocation agricole.	47
Figure 22.	Projections de la hauteur de ruissellement de surface du bassin versant du lac Boivin.....	56
Figure 23.	Projections des exportations annuelles de sédiments du bassin versant du lac Boivin.....	57
Figure 24.	Projections des exportations annuelles de phosphore total du bassin versant du lac Boivin.....	58
Figure 25.	Projections des taux spécifiques d'exportation de sédiments des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole du sous-bassin versant du lac Boivin (N=6,066) en fonction de la hauteur du ruissellement de surface (a) et du facteur topographique LS (b).....	61
Figure 26.	Projections des taux spécifiques d'exportation de phosphore des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole du sous-bassin versant du lac Boivin (N=6,066) en fonction du taux d'exportation de sédiments.....	61
Figure 27.	Projections des taux spécifiques d'exportation de phosphore des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole du sous-bassin versant du lac Boivin (N=6,066) en fonction de la saturation du sol en phosphore (a) et de l'apport spécifique de phosphore en prairie (b).	63
Figure 28.	Projection de la hauteur de ruissellement de surface du bassin versant du lac Boivin pour le scénario alternatif de gestion	70
Figure 29.	Projection de la charge de sédiments du bassin versant du lac Boivin pour le scénario alternatif de gestion	71
Figure 30.	Projection de la charge de phosphore du bassin versant du lac Boivin pour le scénario alternatif de gestion	72
Figure 31.	Projections de la hauteur de ruissellement de surface des bassins versants de la MRC de La Haute-Yamaska.....	75
Figure 32.	Projections des flux spécifiques de sédiments des bassins versants de la MRC de La Haute-Yamaska.....	76
Figure 33.	Projections des flux spécifiques de phosphore des bassins versants de la MRC de La Haute-Yamaska.....	77

1. MISE EN CONTEXTE

En 2017, la MRC de La Haute-Yamaska a lancé son Plan directeur de l'eau 2017-2021 (PDE). Le bassin versant du lac Boivin y est identifié comme un des secteurs prioritaires d'intervention et la volonté de la MRC d'agir dans ce bassin est très claire. Les projets menés par l'OBV Yamaska, l'IRDA et le club conseil Gestrie-Sol visent à répondre à l'action 19 du PDE, soit « Cibler, à l'intérieur du bassin versant du lac Boivin, les zones qui exportent davantage de nutriments vers le réseau hydrique, puis encourager les producteurs agricoles concernés à innover, en les accompagnant dans leurs actions visant une rétention du sol agricole et une réduction de la pollution diffuse ».

La présente étude a permis une description fine des débits et des flux de sédiments, de phosphore et d'azote dans le bassin versant du lac Boivin sur la base des suivis hydrométriques de trois de ses sous-bassins versants. L'étude a également supporté une modélisation hydrologique à haute résolution (1 m) de la vulnérabilité du territoire aux émissions de sédiments et de nutriments pour l'ensemble de la MRC de La Haute-Yamaska, incluant le bassin versant du lac Boivin. L'étude donne suite au projet «Suivi hydrométrique et modélisation hydrologique des sédiments et des nutriments du bassin versant du lac Boivin à Granby » réalisé en 2016-2018 par l'IRDA, l'OBV Yamaska et club conseil Gestrie-Sol pour le compte de la Ville de Granby.

Les études précitées complètent par ailleurs la caractérisation du milieu agricole réalisé dans le cadre du Projet collectif en du bassin versant du lac Boivin réalisé par l'OBV Yamaska (Labrie et al., 2018).

2. PRÉSENTATION DE L'ÉQUIPE DE TRAVAIL

L'OBV YAMASKA

L'Organisme de bassin versant de la Yamaska (OBV Yamaska) est un organisme à but non lucratif fondé en 2000 grâce à la volonté de plusieurs acteurs locaux et régionaux. Reconnu depuis 2002 par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) comme l'organisme responsable de la mise en œuvre de la gestion intégrée de l'eau dans le bassin versant de la rivière Yamaska, l'OBV Yamaska est aujourd'hui un organisme très impliqué dans son milieu. Son mandat principal est de développer le Plan directeur de l'eau (PDE) du bassin versant de la rivière Yamaska et d'assurer sa mise en œuvre. Le PDE est un outil de planification visant à déterminer et à hiérarchiser les interventions à réaliser dans un bassin versant pour atteindre les objectifs fixés de manière concertée par l'ensemble des acteurs de l'eau. Afin d'assurer la réalisation de ces objectifs, l'OBV Yamaska travaille à mieux documenter la qualité de l'eau des lacs et des rivières du bassin versant, ainsi qu'à sensibiliser la population aux comportements respectueux de l'environnement.

Rôles dans le projet : Coordination du projet, échantillonnage des cours d'eau et mesures des débits de crues, soutien à l'intégration spatiale des données dans l'outil de diagnostic spatialisé des exportations de phosphore (GÉODEP).

L'IRDA

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif fondée en 1998 qui a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable. L'équipe de recherche coordonnée par Aubert Michaud travaille depuis plus de vingt ans à décrire l'hydrologie et les sols de petits bassins versants en milieu agricole, de même qu'au développement d'outils pour en assurer une gestion durable. Le monitoring de ruisseaux, la géomatique, la télédétection et la modélisation hydrologique sont leurs principaux outils de travail, dans le cadre de recherches-actions à l'échelle de la ferme et de petits bassins versants.

Rôles dans le projet : Direction scientifique, mise en place et opérations des stations hydrométriques, analyse des données de débits et de qualité de l'eau à la base des estimations des charges de sédiments et nutriments, mise en œuvre de la modélisation GÉODEP et production des indices de risques d'exportation de sédiments et de phosphore.

CLUB CONSEIL GESTRIE-SOL

Le club conseil Gestrie-Sol est une organisation sans but lucratif offrant une multitude de services en agroenvironnement. Œuvrant auprès de 300 exploitations agricoles depuis 1993, l'équipe compte six agronomes, un agroéconomiste et deux techniciens agricoles.

Les conseillers accompagnent les entreprises agricoles dans les défis économiques et agroenvironnementaux touchant la fertilisation, la phytoprotection, la conservation des sols, la protection des cours d'eau et l'amélioration de la biodiversité agricole.

Rôles dans le projet : Contact auprès des producteurs agricoles, relevés des données fines à la ferme pour le territoire de Granby (année 2016-2017).

3. VOLET D'ÉTUDE HYDROMÉTRIQUE

Le premier volet de ce rapport présente les résultats du suivi hydrométrique réalisé pour la période du 20 octobre 2016 au 6 septembre 2018 (687 jours)² aux exutoires de trois affluents du lac Boivin, soit les ruisseaux Bouchard et Ostiguy, de même que le cours principal de la rivière Yamaska Nord. Les résultats d'une étude plus détaillée du bassin versant du ruisseau Bouchard, portant sur la période 2016-2020, sont également présentés. Les dispositifs et protocoles expérimentaux utilisés dans le cadre de cette étude ont été développés et validés dans le cadre de projets antérieurs dans diverses régions agricoles du Québec. Au fil des vingt dernières années, l'équipe Bassins versants de l'IRDA a en effet mis en place et coordonné le suivi hydrométrique d'une trentaine de micro-bassins, de superficies variant de 3 à 40 km² dans le cadre de projets de recherche-action réalisés en partenariat avec des intervenants du milieu agricole. Des informations additionnelles sur ces études sont disponibles sur le site web de l'IRDA (IRDA, 2018).

3.1 OBJECTIFS

Dans une perspective d'accompagnement scientifique des démarches entreprises pour la mise en valeur du lac Boivin et de son bassin versant, les principaux objectifs du volet d'étude hydrométrique visaient à :

- Caractériser les problématiques de contamination diffuse de l'eau des principaux affluents du lac Boivin. La méthodologie appliquée supporte la quantification des flux de sédiments et de nutriments (phosphore), de même que l'interprétation des principaux facteurs déterminants de leurs sources et de leur transfert, soit le régime hydrique, les saisons, les propriétés du paysage et des sols ainsi que la vocation et la gestion du parcellaire agricole.
- Outiller les partenaires du projet dans la planification des actions agroenvironnementales. L'interprétation des résultats du suivi hydrométrique supporte la prise de décision quant aux actions à privilégier en vue d'atténuer les apports de nutriments vers les plans d'eau. La distribution des flux observés dans le temps (saisonnalité) et dans l'espace (variabilité spatiale) sont autant d'indices utiles dans l'identification des solutions les mieux adaptées aux problématiques soulevées. Enfin, les observations hydrométriques colligées aux trois stations hydrométriques ont permis de caler et valider les projections des flux de sédiments et de phosphore réalisées dans le cadre du 2^e volet de l'étude dédié à la modélisation hydrologique.

² Ces résultats incluent ainsi les données de la première année de suivi hydrométrique (2016-2017) récoltées par l'IRDA et l'OBV Yamaska dans le cadre du projet « Suivi hydrométrique et modélisation hydrologique des sédiments et des nutriments du bassin versant du lac Boivin » réalisé pour le compte de la Ville de Granby.

3.2 MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS

Le dispositif d'étude des trois affluents du lac Boivin s'est appuyé sur l'opération de stations hydrométriques qui ont enregistré en continu des observations sur la vitesse du courant et la hauteur de l'eau, de même que sa température, son signal de conductivité électrique et sa turbidité. Ces informations ont été complétées par des prélèvements d'échantillons d'eau, principalement lors des crues des cours d'eau, qui ont été acheminés au laboratoire pour en déterminer les composantes physico-chimiques. Le traitement des données de débit et du signal géochimique de l'eau, couplé à celui des résultats de dosages au laboratoire des échantillons prélevés ponctuellement dans les cours d'eau, a permis de reproduire en continu les débits et les flux de sédiments et de nutriments des trois affluents du lac Boivin pour l'ensemble de la période 2016-2018. Des campagnes supplémentaires d'échantillonnage de trois branches du ruisseau Bouchard ont également contribué à mieux décrire les transferts de nutriments dans ce petit bassin versant.

3.2.1 Description des sites d'étude

Trois stations hydrométriques ont été installées sur les cours d'eau amont du lac Boivin. La première, située sur la Yamaska Nord, est associée à un bassin versant couvrant 18 527 ha. Ce dernier chevauche les municipalités de Granby, Shefford, Waterloo, Warden, Stukely-Sud, Sainte-Anne-de-la-Rochelle, Saint-Joachim-de-Shefford et Roxton Pond. La 2^e station a été localisée sur le cours d'eau Ostiguy, affluent de la Yamaska Nord. Ce sous-bassin versant couvre une superficie de 3 652 ha et chevauche les municipalités de Granby, Shefford, Saint-Joachim-de-Shefford et Roxton Pond. La dernière station, aménagée sur le ruisseau Bouchard, couvre une superficie de 974 ha et chevauche les municipalités de Granby, Shefford et Roxton Pond. Les localisations des stations hydrométriques, de même que les délimitations de leurs bassins respectifs, sont illustrées en figure 1. La figure 2 offre un aperçu des trois sections de cours d'eau instrumentées.

Le bassin versant du ruisseau Bouchard se distingue des autres affluents de la Yamaska Nord par son élévation relativement plus basse dans le paysage, telle que rapportée au tableau 1. Le relief y est par ailleurs moins accidenté qu'en secteur amont de la rivière, alors que l'altitude culmine à plus de 500 m dans le bassin Ostiguy. Les pentes moyennes des bassins suivent un gradient croissant, depuis 3,2 % au Bouchard, à 5,1 % et 7,7 % aux bassins Yamaska Nord et Ostiguy, respectivement.

Le tableau 2 présente la distribution des séries de sols dominantes des trois bassins à l'étude, de même que les textures et les classes de drainage qui leur sont associées. Dans l'ensemble, les sols de texture franche (loam et loam sableux) dominent les paysages. Au plan de la classe de drainage, en moyenne pour les trois sites, 61 % des sols sont bien drainés et 23 % des sols ont un drainage imparfait, mauvais ou très mauvais. Le bassin Ostiguy se distingue par ailleurs par sa portion importante (23 %) de terrain rocailleux, alors que le bassin Bouchard comprend la plus importante proportion de sols tourbeux.

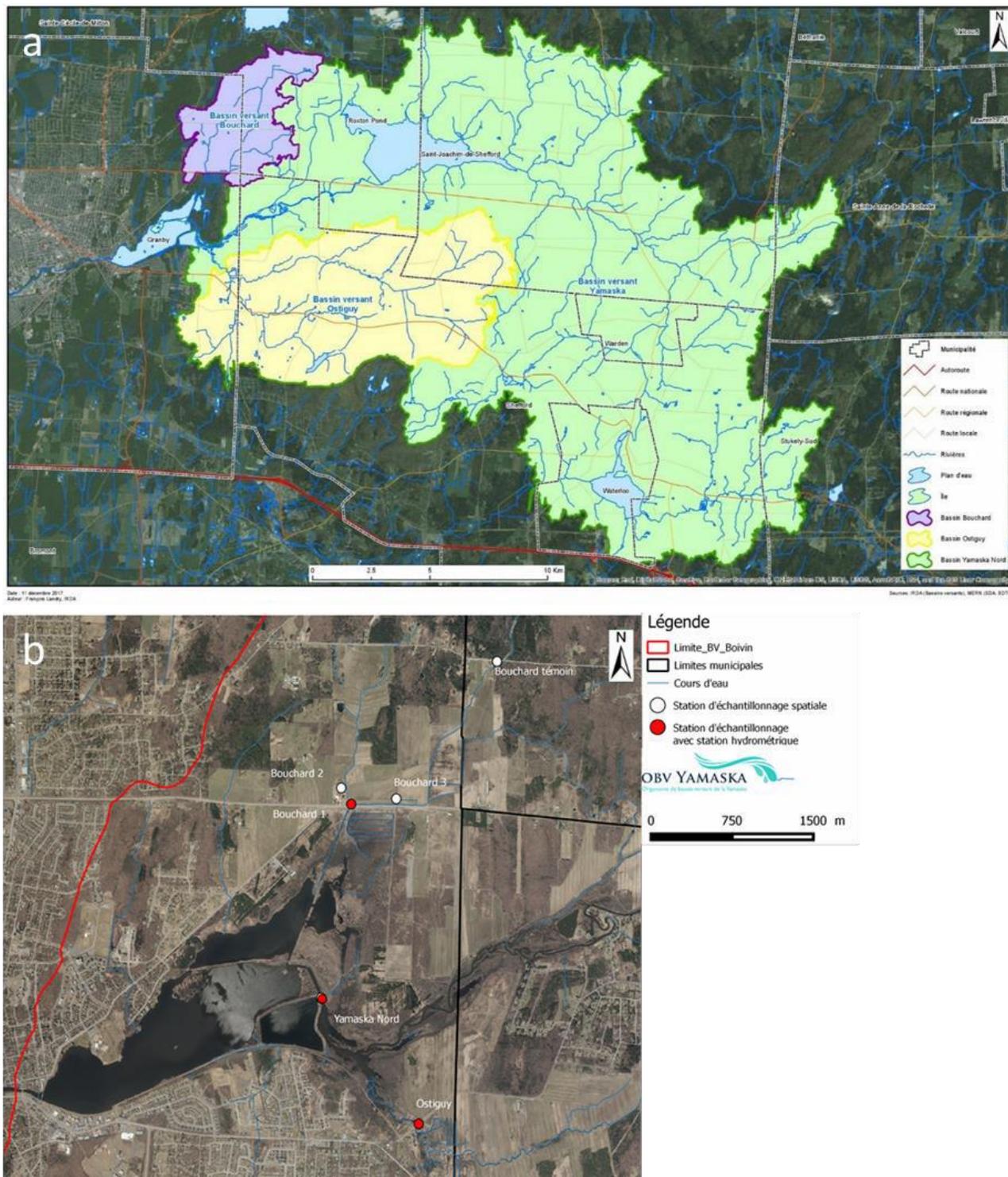


Figure 1. Sous-bassins versants des stations hydrométriques Ostiguy, Boucard et Yamaska Nord (a) et localisation des stations d'échantillonnage (b).



Figure 2. Aperçu des sites des stations hydrométriques Bouchard (a), Ostiguy (b) et Yamaska Nord (c).

Tableau 1. Élévations et pentes des sous-bassins du lac Boivin.

	Station Yamaska Nord			Station Ostiguy			Station Bouchard		
	Min.	Moyenne	Max.	Min.	Moyenne	Max.	Min.	Moyenne	Max.
Élévation (m)	115	211	513	117	194	513	119	141	183
Pente (%)	0	5,14	100	0	7,65	100	0	3,21	27

Source : Statistiques établies à partir d'un modèle numérique d'élévation (MNE) des Données numériques d'élévation du Canada (DNEC) de Ressources naturelles Canada (1:50 000).

Tableau 2. Série, texture et qualité du drainage des sols des sous-bassins du lac Boivin.

Série de sol	Texture	Drainage	Station Yamaska Nord		Station Ostiguy		Station Bouchard	
			ha	%	ha	%	ha	%
Blandford	loam	Bien drainé	1712	9,2	282	7,7	<i>np</i>	0,0
Woodbridge	loam	Modérément bien drainé	438	2,4	<i>np</i>	0,0	<i>np</i>	0,0
Suffield	loam argileux	Imparfaitement drainé	258	1,4	97	2,7	20	2,0
Blandford	loam graveleux	Bien drainé	26	0,1	26	0,7	<i>np</i>	0,0
Shefford	loam graveleux	Bien drainé	1240	6,7	816	22,3	<i>np</i>	0,0
Milby	loam limoneux	Bien drainé	34	0,2	<i>np</i>	0,0	<i>np</i>	0,0
Blandford	loam phase mince	Bien drainé	2161	11,7	<i>np</i>	0,0	<i>np</i>	0,0
Brompton	loam sableux	Mal drainé	2313	12,5	417	11,4	<i>np</i>	0,0
Mawcook	loam sableux	Mal drainé	<i>np</i>	0,0	<i>np</i>	0,0	19	1,9
Milton	loam sableux	Mal drainé	791	4,3	448	12,3	<i>np</i>	0,0
Racine	loam sableux	Bien drainé	5618	30,3	343	9,4	325	33,3
Rubicon	loam sableux	Imparfaitement drainé	499	2,7	139	3,8	31	3,2
Saint-François	loam sableux	Bien drainé	59	0,3	<i>np</i>	0,0	<i>np</i>	0,0
Knowlton	loam sableux graveleux	Rapidement drainé	183	1,0	61	1,7	<i>np</i>	0,0
Roxton	loam sableux graveleux	Bien drainé	50	0,3	<i>np</i>	0,0	442	45,4
Sainte-Sophie	sable	Bien drainé	41	0,2	33	0,9	<i>np</i>	0,0
Marécage	organique	Très mal drainé	235	1,3	9	0,3	10	1,1
Tourbe	organique	Très mal drainé	493	2,7	65	1,8	49	5,0
Terrain rocailleux accidenté	<i>np</i>	<i>np</i>	1390	7,5	822	22,5	75	7,8
Alluvions non différenciés	à textures variables	<i>np</i>	213	1,2	75	2,1	<i>np</i>	0,0
Étendue d'eau	<i>np</i>	<i>np</i>	764	4,1	19	0,5	3	0,3
île	à textures variables	<i>np</i>	2	0,0	0	0,0	<i>np</i>	<i>np</i>
Total			18523	100	3654	100	974	100

Source : Études pédologiques, IRDA

En ce qui a trait à l'occupation du territoire, la forêt domine les trois bassins versants à l'étude, tel que présenté en figure 16 et au tableau 3. Le bassin versant Bouchard se distingue cependant par une occupation agricole relativement plus importante que pour l'Ostiguy et la Yamaska Nord, avec près de 43 % de sa superficie en culture, alors qu'elle est de l'ordre de 25 % pour l'Ostiguy et la Yamaska Nord. Le portrait des cultures demeure sensiblement le même pour les trois bassins à l'étude. Suivant le portrait des cultures assurées, complémenté par celui de la carte écoforestière, la culture de foin et/ou les pâturages occupent la plus large part des superficies, soit 83 % de superficies en culture. La figure 3 illustre la distribution spatiale des principales classes d'occupation des sols pour l'ensemble du lac Boivin et les sous-bassins des trois stations hydrométriques.

Tableau 3. Occupation du territoire à l'étude.

	Lac Boivin		Yamaska Nord		Bouchard		Ostiguy	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Céréales à paille	155	0,7%	143	0,8%	6	0,7%	29	0,8%
Prairie	4 392	20,8%	3 811	20,6%	298	30,6%	787	21,5%
Maïs	443	2,1%	380	2,1%	37	3,8%	69	1,9%
Soya	274	1,3%	265	1,4%	8	0,9%	67	1,8%
Petits fruits	29	0,1%	10	0,1%	13	1,3%	0	0,0%
Total agricole	5 293	25,1%	4 610	24,9%	364	37,3%	951	26,0%
Forêt	11 444	54,2%	10 432	56,3%	526	54,0%	1 978	54,2%
Friches	807	3,8%	681	3,7%	31	3,2%	61	1,7%
Résidentiel	1 766	8,4%	1 376	7,4%	24	2,5%	480	13,2%
Routes non pavées	484	2,3%	425	2,3%	17	1,7%	124	3,4%
Routes pavées	218	1,0%	163	0,9%	6	0,6%	40	1,1%
Milieux humides	139	0,7%	88	0,5%	5	0,5%	0	0,0%
Eaux	957	4,5%	752	4,1%	2	0,2%	18	0,5%
Total bassin	21 109		18 527		974		3 652	

Sources : FADO, 2017 (BDCA) et MFFP, 2010 (Carte écoforestière)

3.2.2 Opération des stations hydrométriques

Les dispositifs et protocoles mis en place à l'automne 2016 sont spécifiquement adaptés à la mesure des débits et des flux de sédiments et de nutriments et à la détection de réponses de la qualité de l'eau dans le temps. Les stations hydrométriques regroupent plusieurs instruments localisés aux abords et dans le cours d'eau (tableau 4). Les visites régulières aux sites permettent l'entretien des équipements, les mesures de débits instantanés, la récolte d'échantillons d'eau des ruisseaux et l'acquisition des différentes données enregistrées par les instruments.

Tableau 4. Description des instruments en place aux stations hydrométriques.

Équipements de mesure	Station Yamaska Nord	Station Ostiguy	Station Bouchard
Sonde multi-paramètres (YSI) (turbidité, conductivité électrique et température)	x	x	x
Sonde à pression (HOBO) (hauteur de la colonne d'eau)		x	
Sondes à pression et acoustique (ISCO) (hauteur de la colonne d'eau et vitesse)		x	x

Les sondes à pression et acoustiques (ISCO) sont installées au centre de la section d'écoulement alors que la sonde multi-paramètres, munie d'un dispositif de flottaison, est insérée à l'intérieur d'un cylindre de plastique perforé et installée près de la rive. Les dispositifs d'alimentation solaire et électroniques d'enregistrement des mesures sont installés sur la rive (figure 3). Les sondes multi-paramètres sont retirées du cours d'eau avant la mise en place du couvert de glace (début décembre) et réinstallées à la fin de l'hiver (mi-mars). En période hivernale, l'équipe de terrain brise la glace afin de procéder aux jaugeages et échantillonnages ponctuels (figure 4).



Figure 3. Installation des équipements à la station Bouchard.



Figure 4. Jaugeage de la station Ostiguy à l’hiver 2017.

Chaque station hydrométrique fait l’objet d’un entretien selon un intervalle moyen de quatre semaines. L’équipe terrain de l’IRDA nettoie alors les sondes et en extrait les données. La section du cours d’eau est nettoyée au besoin (sédiments, végétation, glace) afin de permettre la mesure de la section d’écoulement et des vitesses de son courant. Les mesures rapprochées de la vitesse d’écoulement et de la hauteur de la colonne d’eau sur toute la largeur du cours d’eau permettent alors d’estimer avec précision le débit du cours d’eau. Dans le cadre de ce projet, ces mesures ont été effectuées sur les ruisseaux Bouchard et Ostiguy. Un moulinet à godet ou acoustique (figure 5) a été utilisé pour les mesures, à raison d’un minimum de 15 mesures par section d’écoulement, d’une berge à l’autre, suivant un espacement régulier. Au cours de la période d’étude, une trentaine de campagnes de mesures de débit ont été effectuées sur chacun des cours d’eau Bouchard et Ostiguy, en visant principalement des épisodes hydrologiques de forte intensité. Le suivi des débits de la rivière Yamaska Nord est pour sa part assuré par l’équipe de la Direction de l’expertise hydrique (DEH) du MELCC (station no. 030309); à 0,2 km en amont du pont-route à Shefford-Vale, en aval du réservoir Choinière. La station d’échantillonnage est cependant localisée plus en aval, juste en amont de l’entrée de la rivière dans le lac Boivin.

3.2.3 Campagnes d’échantillonnage des cours d’eau

À chaque visite d’entretien des stations hydrométriques par l’équipe de l’IRDA, un échantillon d’eau est prélevé et rapporté au laboratoire pour l’analyse de sa qualité. L’équipe de l’OBV Yamaska a pour sa part coordonné les campagnes de mesures de débits et d’échantillonnage des cours d’eau en période de crue. Pour bien décrire chaque évènement, une première campagne d’échantillonnage était effectuée en période de montée de la crue, tel qu’observé en ligne sur la page WEB de la station Yamaska Nord de la DEH-MELCC. Deux autres campagnes étaient réalisées dans les 36 heures suivant ce même pic, séparées minimalement par quatre heures entre chacune d’elle. Au cours du projet, les échantillons ont été répartis à travers chaque saison afin d’obtenir un portrait de la variabilité saisonnière de la qualité de l’eau.

Un total de 183 échantillons a été dosé pour l’analyse physico-chimique dans les laboratoires de l’IRDA. La figure 6 illustre la distribution des campagnes d’échantillonnage et des prises de mesure du débit suivant les débits journaliers des trois cours d’eau à l’étude. Dans l’ensemble, la comparaison des débits journaliers et des débits échantillonnés illustre une excellente couverture des crues des ruisseaux, qui contribuent à la majeure partie des charges de sédiments et de nutriments au lac Boivin.



Figure 5. Mesures du débit instantané, à l'aide du moulinet hydrométrique, à la station Bouchard.

Des échantillonnages ponctuels de trois sections additionnelles du ruisseau Bouchard ont complété les observations colligées en continu à la station hydrométrique principale (figure 1b). Au total, 19 campagnes ont permis de bien documenter la variabilité dans le temps de la qualité de l'eau, depuis l'amont jusqu'à la station en aval du bassin versant. En plus de fournir des indications précises sur les réponses hydrologiques du petit bassin versant, les observations colligées en 2016-2020 pourront éventuellement servir de balise précise permettant de quantifier le changement dans les charges de sédiments et de nutriments suivant des actions agroenvironnementales réalisées dans le bassin versant.

Lors des campagnes, les échantillons ont été prélevés dans des bouteilles de 500 ml spécialement identifiées, puis conservées au froid. Par mesure de sécurité et pour assurer la prise d'un échantillon représentatif du cours d'eau, une perche télescopique ou un poids lesté a été utilisé lors des prélèvements. Les bouteilles étaient rincées une première fois avec l'eau de surface, puis plongées au centre de la colonne d'eau pour prendre l'échantillon final. Le dosage des échantillons d'eau au laboratoire a été réalisé au laboratoire d'analyse agroenvironnementale de l'IRDA afin de déterminer les concentrations de matières en suspension (MES), azote ammoniacal ($N-NH_4$), nitrates ($N-NO_3$), calcium (Ca) et autres éléments majeurs et mineurs en solution (Greenberg et al., 1992a, b, d). La spéciation des formes de phosphore a également été déterminée en laboratoire. Suivant la détermination en phosphore total, les échantillons d'eau ont été dosés pour leurs composantes en phosphore biodisponible, dissout et réactive soluble (principalement sous forme d'ortho-phosphates) suivant les protocoles de Murphy et Riley (1962), Greenberg et al. (1992c) et Sharpley et al. (1991). Cette spéciation des formes de phosphore a permis de mettre en évidence la variabilité des formes de P et sa biodisponibilité potentielle. Cette caractérisation est particulièrement pertinente lorsqu'il est question d'évaluer le risque d'eutrophisation d'un plan d'eau.

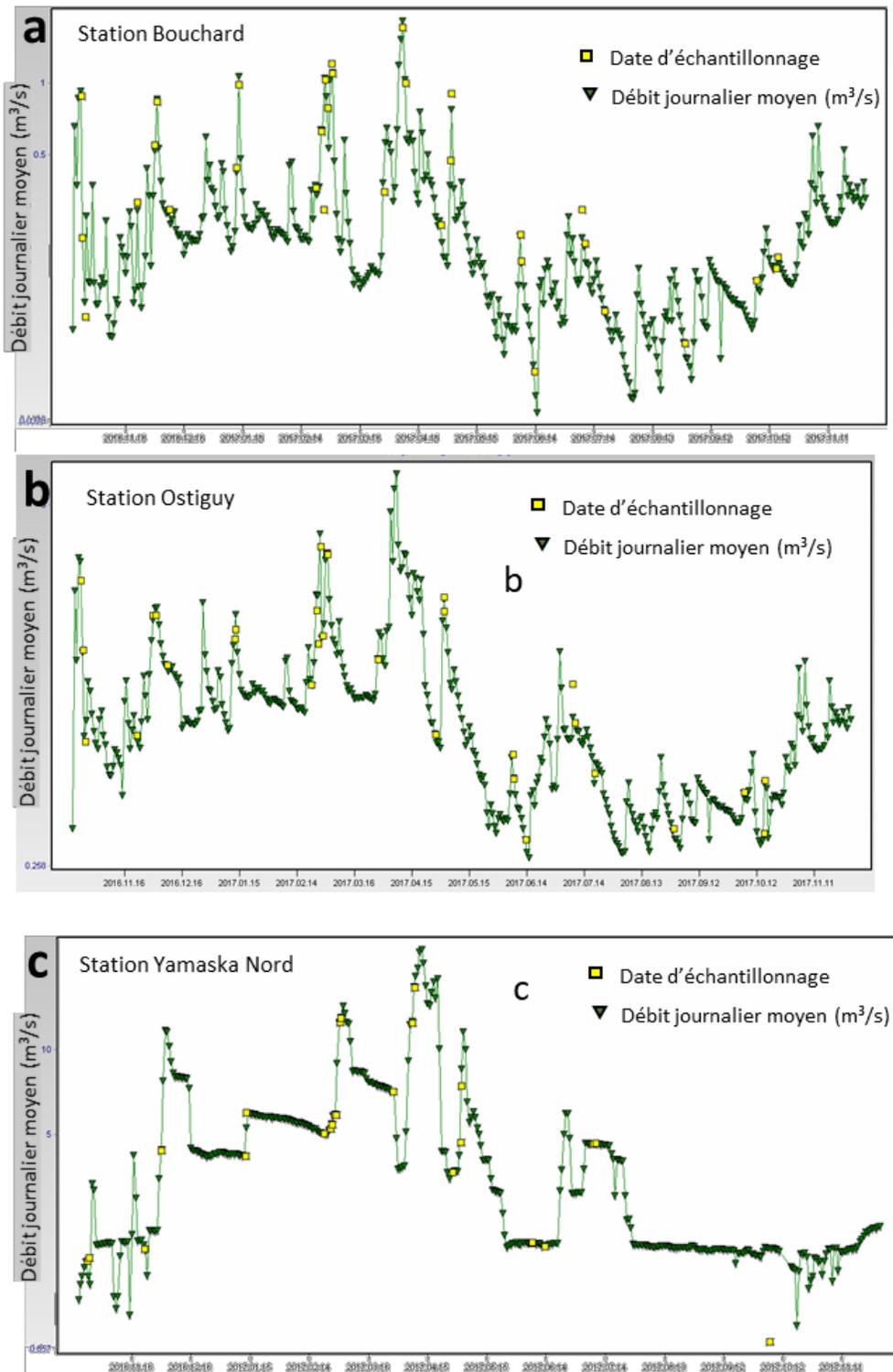


Figure 6. Distribution dans le temps des débits journaliers moyens et des débits observés au moment des échantillonnages aux stations Boucard (a), Ostiguy (b) et Yamaska Nord (c).

3.2.4 Résultats du suivi hydrométrique des stations principales

Les données brutes recueillies sur le terrain permettent de produire plusieurs types de résultats utiles à l'interprétation du fonctionnement hydrologique des bassins versants, incluant :

- L'intensité des débits et leur évolution au cours de l'année (débits instantanés et journaliers);
- La séparation des écoulements en ses composantes de surface et de souterrain;
- Les charges de matières en suspension (MES) et d'éléments fertilisants exportés.

Cette section présente les résultats du suivi hydrologique du bassin du lac Boivin pour la période d'octobre 2016 à septembre 2018. Les débits stratifiés des ruisseaux et leurs flux respectifs de sédiments sont d'abord présentés, suivis des flux de phosphore, de nitrates et de calcium.

3.2.4.1 Débits et séparation des écoulements de surface et souterrains

Les débits instantanés (aux 15 minutes) et journaliers moyens sont calculés à partir des données brutes de hauteurs et de vitesses colligées par les instruments sur le terrain. L'ensemble des mesures ponctuelles du débit des cours d'eau réalisées en cours d'année permet d'établir la courbe de tarage *hauteur : vitesse : débit* spécifique à chaque station. Compte tenu des influences du couvert de glace en conditions hivernales, de la végétation abondante en été et des barrages sur le refoulement de l'écoulement, ces facteurs ont été pris en considération dans le dépouillement des données au cours de la période d'étude. Pour les besoins des comparaisons entre les bassins à l'étude, les estimations de débits sont traduites en **hauteur spécifique d'eau exportée** (mm) ou en **débit spécifique** ($L s^{-1} ha^{-1}$) pour une période de temps donnée.

Les hauteurs d'eau exportées sont également séparées selon leur cheminement de surface (ruissellement) ou souterrain (drainage artificiel et résurgence au ruisseau), en s'appuyant sur les mesures de conductivité électrique et de débits des ruisseaux. Cette détermination est fondée sur le principe que l'eau qui s'est infiltrée dans le sol se charge de minéraux et présente une conductivité électrique plus élevée que l'eau qui a rejoint le ruisseau par les voies de surface. Le dépouillement des courbes *conductivité : débit* permet ainsi de détecter le déclenchement du ruissellement de surface puis d'en quantifier la contribution à l'écoulement global du ruisseau au pas de temps de 15 minutes suivant une approche de calcul du bilan de masse (Michaud et al., 2009a).

La proportion de l'eau d'origine souterraine par rapport à l'écoulement total est exprimée sur la base des ratios observés dans les conductivités électriques de l'eau suivant l'équation suivante :

$$QB_i = \frac{Q_i(C_i - C_{\min})}{CB_i - C_{\min}}$$

où: QB_i = Hauteur d'eau associée à un écoulement souterrain au temps « i » ($mm jour^{-1}$);

Q_i = Hauteur d'eau journalière totale au temps « i » ($mm jour^{-1}$);

C_i = Conductivité au temps « i » ($\mu S/cm$);

C_{\min} = Conductivité de référence du ruissellement de surface ($\mu S/cm$);

CB_i = Conductivité de l'écoulement de base au temps « i » ($\mu S/cm$).

La figure 7 présente, à titre d'exemple, les observations de la crue du 7 avril 2017 pour chaque bassin à l'étude. Les variations du débit, de la turbidité et de la conductivité électrique de l'eau sont exprimées en fonction du temps. Précédant la crue, en régime d'écoulement de base, le débit est à son plus bas et la conductivité à son niveau maximum. En réponse à la crue des eaux, la conductivité diminue rapidement avec l'apport croissant de ruissellement de surface, alors que la turbidité augmente, témoignant des processus d'érosion et de transport de sédiments à la rivière. En décrue, la remontée du signal de conductivité, de même que la baisse de la turbidité, témoignent alors de la proportion croissante de l'écoulement souterrain de l'eau qui atteint l'exutoire du ruisseau.

La comparaison des évolutions dans le temps des débits et des signaux de turbidité et de conductivité au cours de l'évènement du 7 avril 2017 met en relief des différences entre les signatures géochimiques des cours d'eau à l'étude. D'abord, la moindre amplitude de la variation du signal de conductivité du ruisseau Bouchard, par rapport aux stations Ostiguy et Yamaska Nord, témoigne vraisemblablement de la nature des sols des bassins versants. La nature calcaire des roches mères de la portion amont du bassin versant de la Yamaska Nord favoriserait en effet des contrastes plus élevés du signal de conductivité.

Il est par ailleurs remarqué que le signal de conductivité varie considérablement à la station de la Yamaska Nord, malgré une très faible variation du débit. Cette observation traduit l'influence d'une retenue d'eau en amont (réservoir Choinière), qui minimise la variation du débit. Le signal géochimique traduit néanmoins un contraste marqué dans l'origine des écoulements, soit l'arrivée d'un important apport de ruissellement de surface, faiblement chargé en électrolytes, qui a pour résultat de réduire considérablement la conductivité électrique de l'eau.

La comparaison des signaux de turbidité témoigne pour sa part des sédiments en suspension transportés par chacun des cours d'eau. Le pic relativement moins élevé du signal de turbidité de la station Yamaska Nord (95 NTU) par rapport aux stations Ostiguy et Bouchard (150-220 NTU) témoigne du phénomène de sédimentation associé à la retenue des eaux dans le réservoir Choinière.

La figure 8 illustre les précipitations totales et les débits journaliers observés aux stations des cours d'eau Bouchard, Ostiguy et Yamaska Nord pour la période d'étude, d'une durée de 687 jours, soit du 20 octobre 2016 au 6 septembre 2018 (687 jours). Dans l'ensemble, les hauteurs totales d'eau rapportées sur une base annuelle se situent à 848 mm, 813 mm et 750 mm pour les bassins Bouchard, Ostiguy et Yamaska Nord, respectivement. Une recharge soutenue de l'aquifère profond dans le bassin versant de la Yamaska Nord, en lien avec les propriétés géologiques du territoire, expliquerait que le débit spécifique à la station hydrométrique soit relativement moins élevé qu'aux stations plus en aval. La comparaison des hydrogrammes des trois bassins illustre par ailleurs des amplitudes moindres de variations du débit sur la Yamaska Nord, reflétant l'influence des ouvrages hydrauliques sur la rivière. Les débits des bassins Bouchard et Ostiguy sont relativement en phase, bien que le ruisseau Bouchard témoigne de débits spécifiques un peu moins élevés en période d'étiage. Le relief montagneux de la portion amont du bassin Ostiguy suggère que le phénomène de résurgence de l'aquifère peu profond vers le cours d'eau contribue au soutien du débit d'étiage.

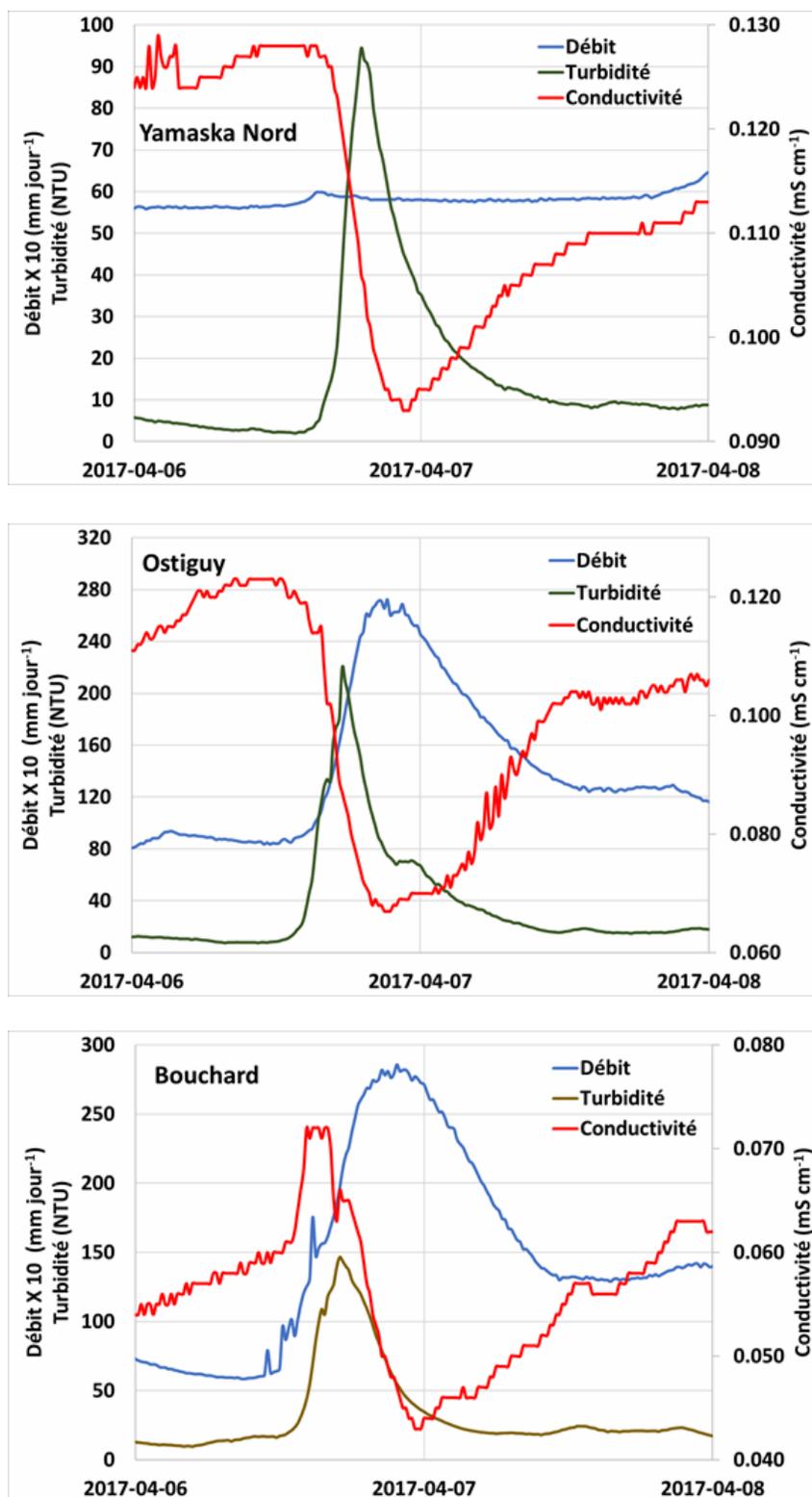


Figure 7. Variation du débit, de la turbidité et de la conductivité au pas de temps de 15 minutes pour la crue du 7 avril 2017 observée aux trois stations hydrométriques.

Sans surprise, les débits spécifiques les plus élevés observés aux trois stations sont associés à la période printanière hâtive, alors que la fonte du couvert de neige et les précipitations sur des sols saturés en eau favorisent l'émission du ruissellement. Quelques épisodes de redoux hivernaux contribuent également à d'importants volumes d'eau exportés au cours des deux périodes hivernales à l'étude. Les débits spécifiques les plus élevés sont systématiquement observés à la station Bouchard. Cette activité hydrologique plus intense reflète la position relativement plus basse occupée par le bassin versant dans le paysage, favorisant le maintien d'une nappe superficielle plus près de la surface. Le phénomène est illustré en figure 9, représentant la séparation des écoulements de base et des écoulements rapides avec une forte composante de ruissellement de surface au ruisseau Bouchard en 2017 et en 2018. Cette séparation des écoulements est dérivée de l'analyse du signal de conductivité électrique qui traduit un fort contraste entre l'écoulement souterrain, chargé en électrolytes, et le ruissellement de surface relativement moins chargée en raison d'un contact plus court avec la matrice du sol.

Globalement, les résultats démontrent un fort gradient saisonnier dans la séparation des débits. La période du printemps hâtif est dominée par des écoulements rapides, présumément associés à des cheminements de surface ou des écoulements préférentiels rapides vers les drains souterrains. Les périodes estivales et automnales sont plutôt caractérisées par des écoulements souterrains plus lents, typiquement associés à la résurgence de la nappe au cours d'eau. En 2017, la contribution des écoulements rapides au ruisseau Bouchard est estimée à 270 mm, pour une hauteur d'eau totale de 482 mm pour la période de la fin mars à novembre (période d'opération des sondes multi-paramètres). En 2018, les écoulements rapides cumulent 140 mm, pour une hauteur totale de 345 mm. Une proportion d'écoulements rapides entre 44 % et 59 % témoigne d'une activité hydrologique de surface particulièrement intense comparativement aux hauteurs de ruissellement de surface généralement estimées en Montérégie (Michaud et al., 2014).

L'estimation des séparations des écoulements aux stations Ostiguy et Yamaska Nord est pour sa part compliquée par l'effet du refoulement du débit aux deux stations et n'est donc pas présentée. Les signaux de conductivité et de turbidité observés aux trois stations demeurent néanmoins en phase au cours de la période d'étude, tel qu'illustré en figure 7, et indiquent une synchronicité dans les processus d'érosion et de ruissellement de surface à l'œuvre sur les terres des trois sous-bassins versants.

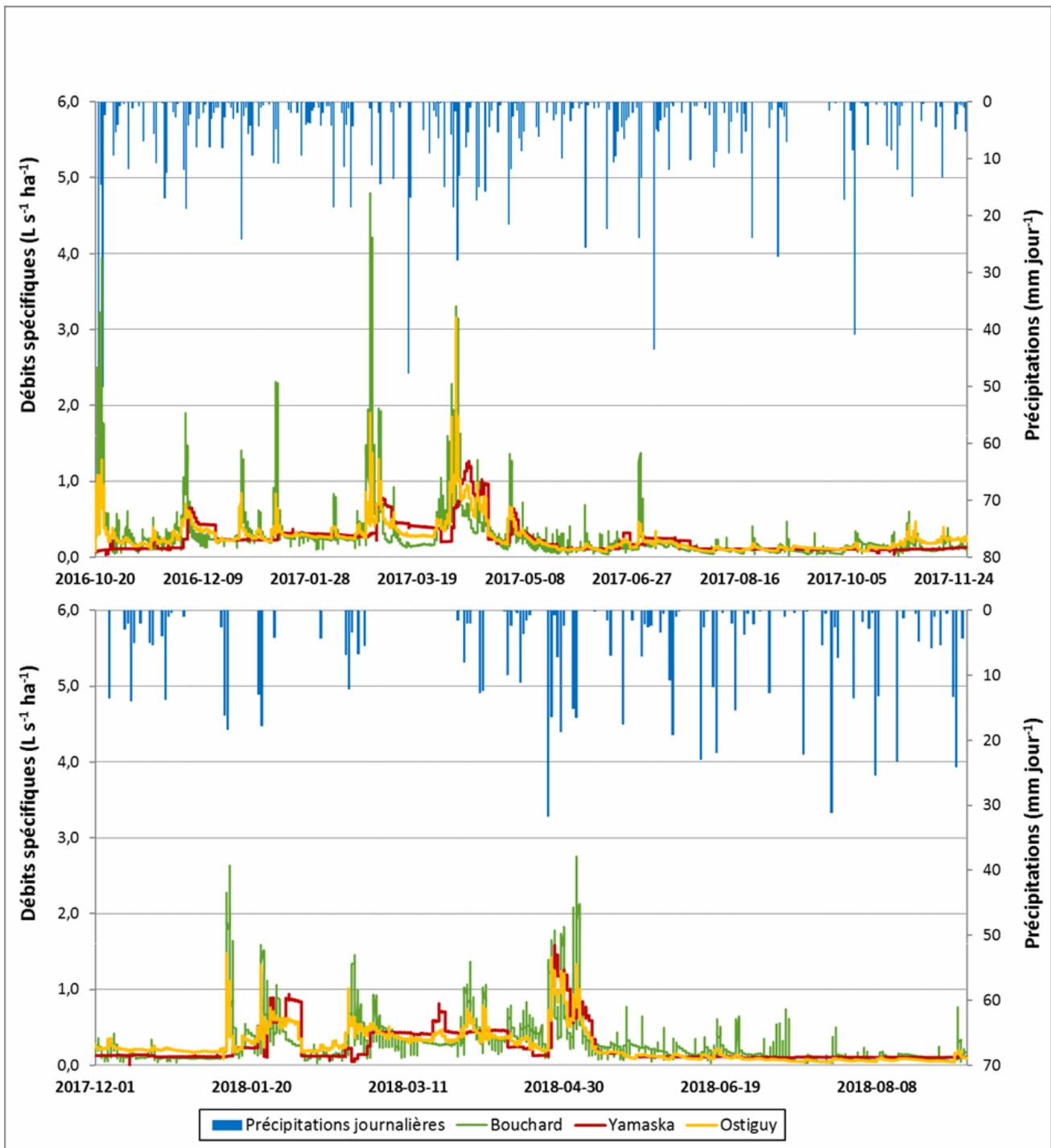


Figure 8. Séries chronologiques des débits spécifiques et des précipitations journalières observés aux trois stations pour les campagnes 2016-2017 et 2017-2018.

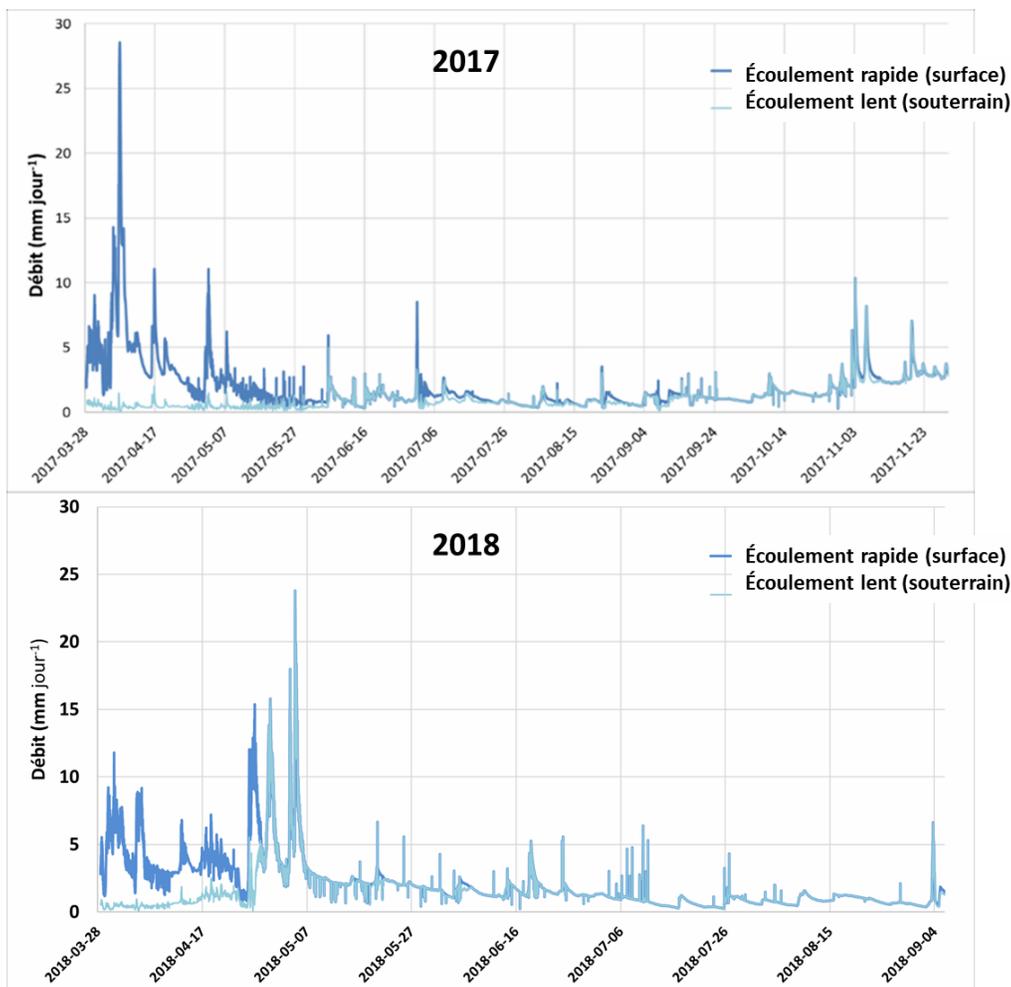


Figure 9. Séparation de l'écoulement de surface et souterrain pour le cours d'eau Bouchard en 2017 et 2018.

3.2.4.2 Estimation des flux de sédiments et de nutriments aux stations hydrométriques

Aux trois stations hydrométriques, rappelons que le débit et le signal de turbidité sont mesurés de façon continue et que la concentration en nutriments est plutôt mesurée de façon ponctuelle, au moyen de la prise d'échantillons d'eau et de leur dosage en laboratoire. Par définition, le flux d'un élément donné est le produit instantané du débit et de sa concentration. L'estimation des flux de sédiments consiste ainsi à multiplier les mesures de débits et de concentrations en sédiments (matières en suspension, MES), dérivées du signal de turbidité enregistré en continu. L'estimation des flux de nutriments sur la base des dosages ponctuels de la qualité de l'eau consiste alors à développer des modèles statistiques (régressions linéaires) exprimant l'évolution de la concentration d'un élément donné (P total, nitrates, etc.) en fonction du débit du cours d'eau. La relation développée est ensuite mise à profit dans les calculs d'interpolation des flux entre les jours où des valeurs observées sont disponibles. L'incertitude de cette interpolation est estimée suivant une approche de validation croisée (*Jack knife*) où la capacité du modèle à exprimer la valeur de chacune des observations, retirées une à une, est évaluée. Pour les bassins de la taille de la présente étude, le critère de qualité de l'ajustement du modèle d'estimation des flux (CV) est fixé à 0,20 (Walker, 1998).

Les figures 10 à 12 illustrent la distribution des observations instantanées de concentrations en calcium (Ca), en matières en suspension (MES), en phosphore total (P Total) et en nitrates (NO₃) pour les stations hydrométriques Bouchard, Ostiguy et Yamaska Nord, respectivement. Ce portrait d'ensemble de la variabilité de la qualité de l'eau, au moment des échantillonnages simultanés des trois cours d'eau, met en relief des signatures spécifiques, propres à chaque bassin versant. Deux facteurs principaux expliquent cette variabilité, soit les conditions hydrologiques à l'œuvre lors du prélèvement d'échantillons (débit, répartition surface/souterraine, montée vs décrue) et la période de l'année (saisonnalité). En saison de croissance des cultures, par exemple, les apports d'intrants et les cycles naturels de mobilisation, de transformation et de prélèvement des nutriments par les plantes influencent les quantités de nutriments disponibles à l'exportation.

Les figures 13 à 15 illustrent pour leur part les résultats de la modélisation statistique des flux journaliers de sédiments et nutriments au cours de la période d'étude, soit d'octobre 2016 à septembre 2018 (687 jours). Les tableaux 5 et 6 présentent enfin la sommation des flux (charges) de sédiments et nutriments à chaque station et pour chacun des paramètres de qualité de l'eau. Malgré une grande dispersion des valeurs de concentrations observées dans les échantillons prélevés lors des crues des cours d'eau, pour les différents paramètres de qualité de l'eau, l'ajustement des modèles de calcul des flux est estimé satisfaisant, rencontrant le critère de coefficient de variation croisée de l'ordre de 20 %. Les résultats sont commentés ci-après pour chacun des paramètres de qualité à l'étude.

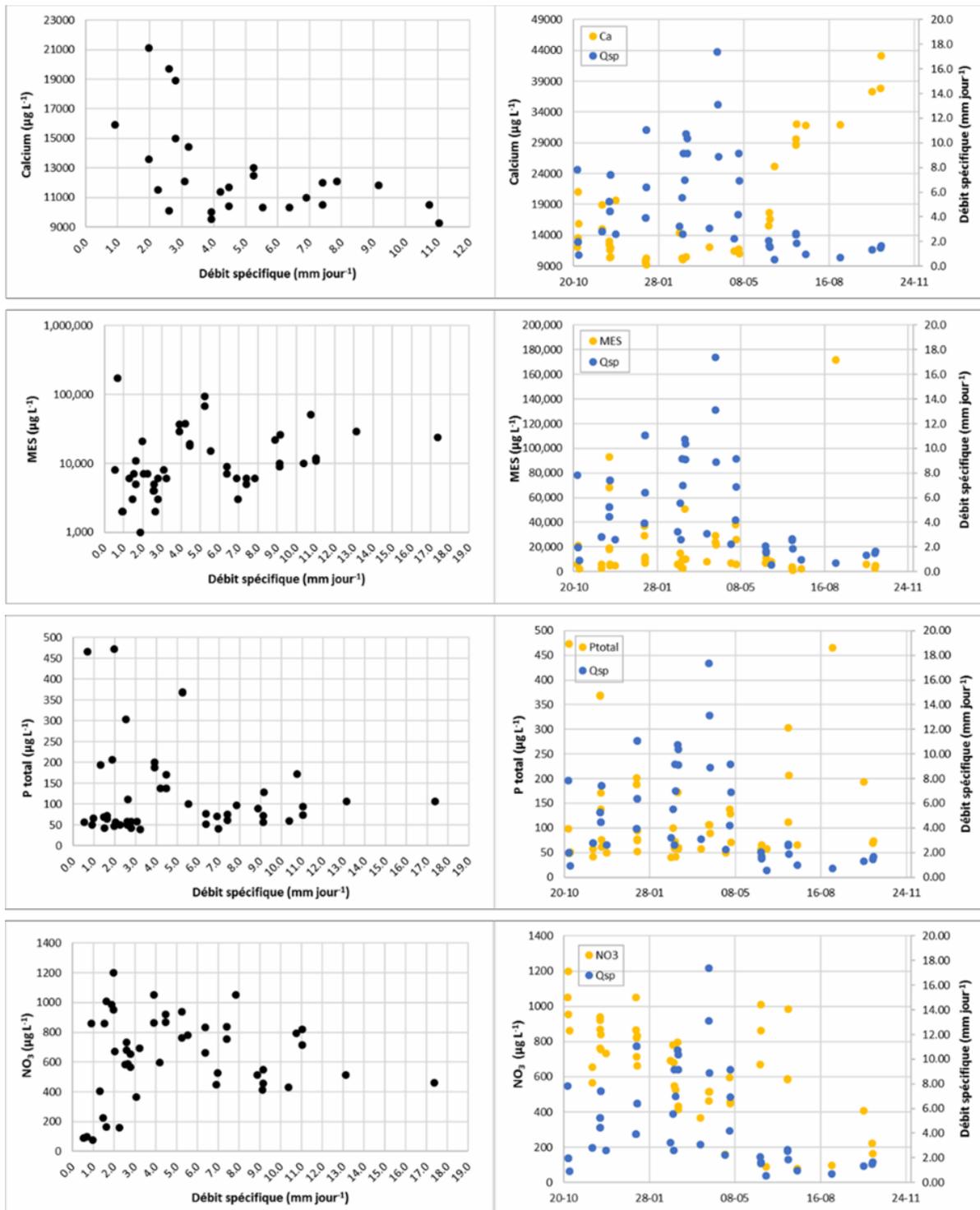


Figure 10. Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO₃) en fonction du débit spécifique et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique du ruisseau Bouchard.

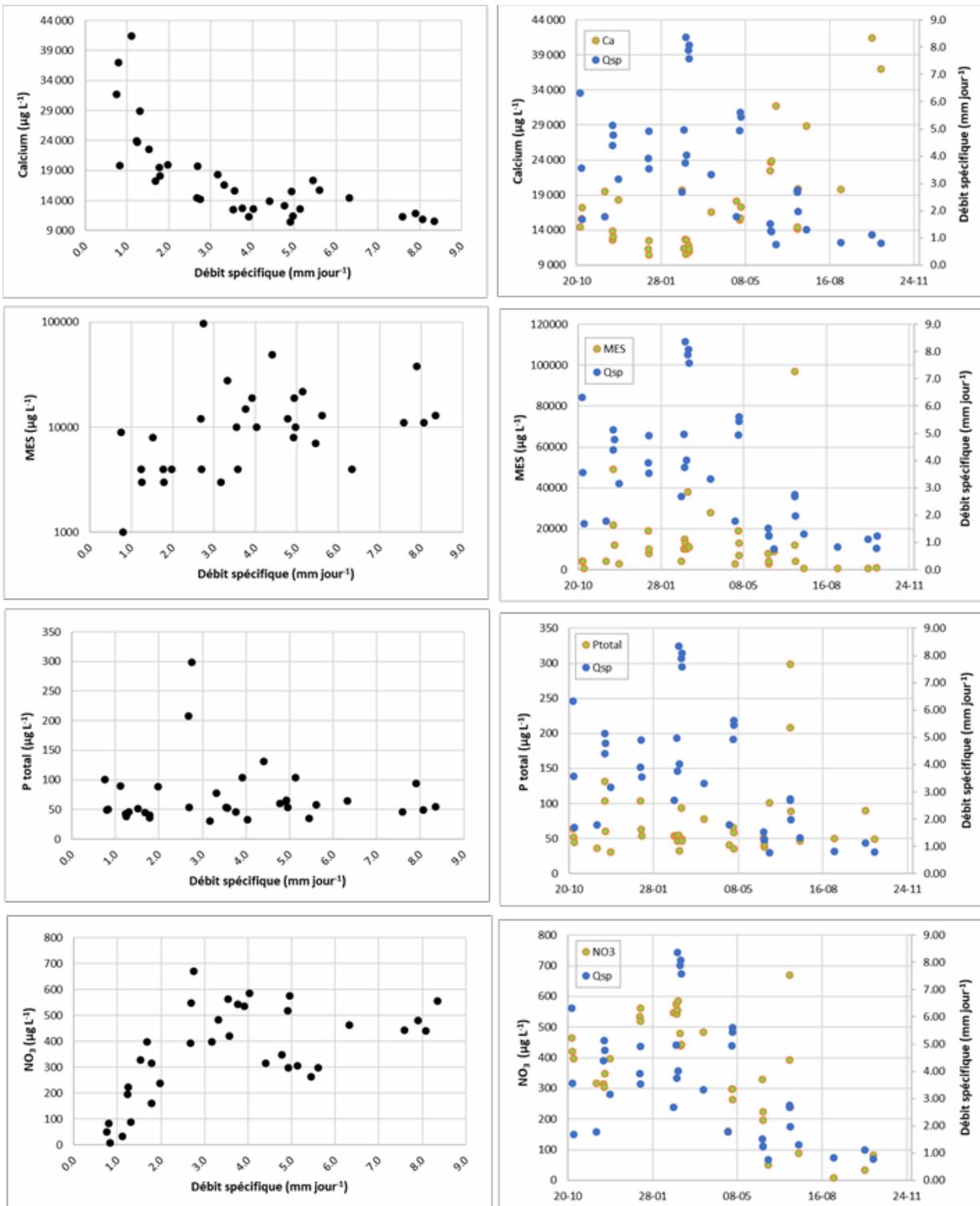


Figure 11. Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO₃) en fonction du débit spécifique et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique du ruisseau Ostiguy.

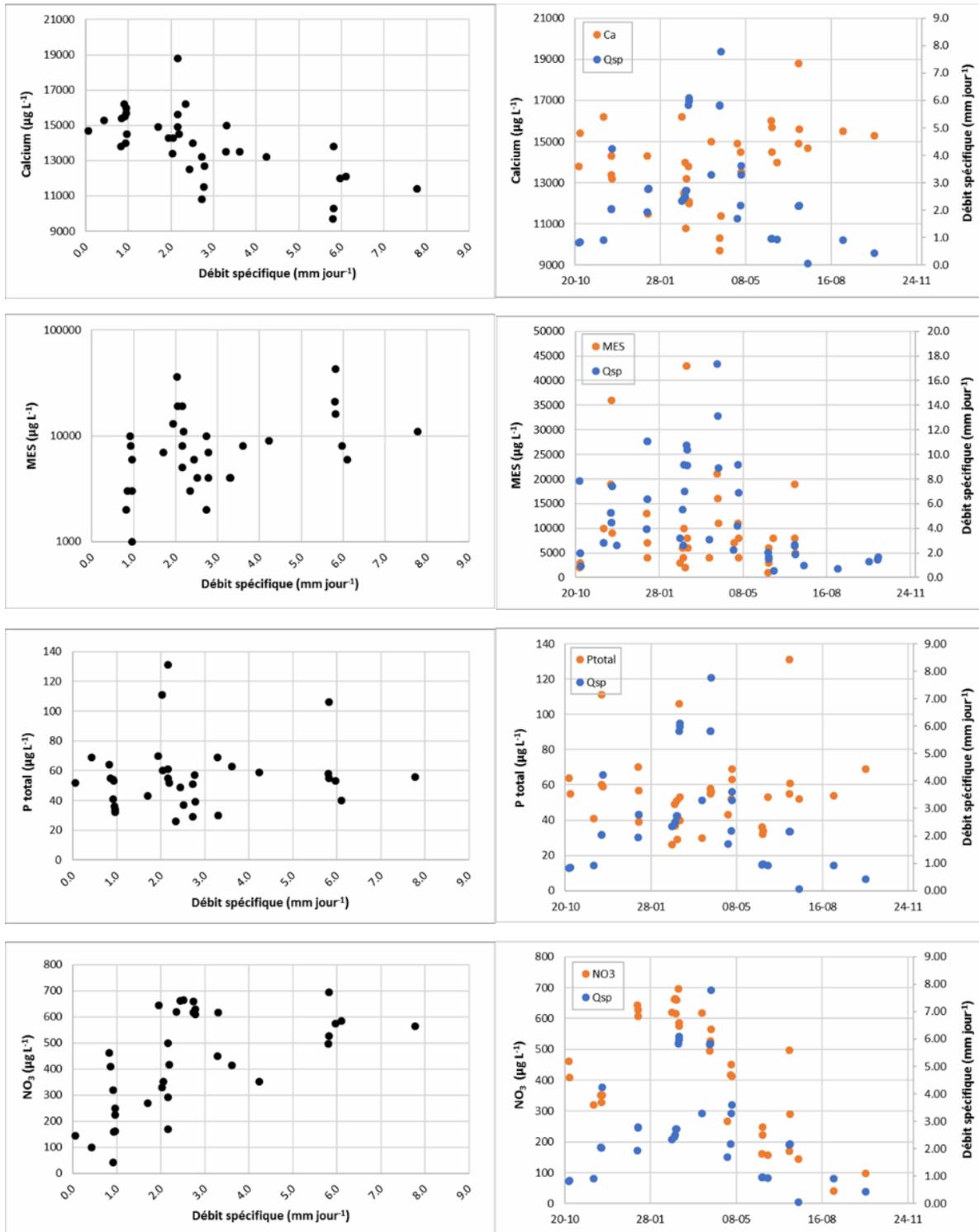


Figure 12. Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO₃) en fonction du débit spécifique et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique de la rivière Yamaska Nord.

CALCIUM

La distribution des concentrations en calcium (Ca) aux trois stations hydrométriques est fortement influencée par le débit, tel qu'illustré aux figures 10 à 12. Le patron est similaire à celui du signal de conductivité électrique observé en continu, compte tenu que ces deux paramètres sont fortement corrélés. En effet, le Ca est un électrolyte (cation) qui contribue à une large part de la conductivité de l'eau. La concentration en Ca de l'eau du cours d'eau est à son maximum en condition d'étiage, alors que l'aquifère peu profond resurgit au cours d'eau. Les minéraux entraînés depuis les horizons superficiels du sol vers le cours d'eau enrichissent de façon significative le faible débit d'eau. Les valeurs de concentrations en Ca observées aux ruisseaux Bouchard et Ostiguy sont ainsi bien structurées en fonction du débit (figures 10 et 11), alors que la distribution des concentrations en Ca à la station de la Yamaska Nord reflète l'influence du barrage en amont.

Les observations des plus basses concentrations en Ca témoignent à l'inverse d'un phénomène de dilution, résultant de l'apport de ruissellement de surface, moins chargé en électrolytes. Ce même gradient supporte la séparation des écoulements sur la base du signal de conductivité décrit précédemment. Le point d'inflexion de la concentration en Ca en fonction du débit du cours d'eau reflète les conditions hydrologiques où le ruissellement constitue une part croissante du débit total du ruisseau. Ce niveau d'activité hydrologique, que nous appellerons *débit limite*, est important dans l'interprétation des flux de nutriments et de sédiments. Il témoigne en effet de l'activation du transfert diffus de sédiments et de phosphore via le ruissellement de surface. Celui-ci est responsable de la plus large part des exportations de sédiments et de phosphore vers le cours d'eau. Pour le ruisseau Bouchard, le *débit limite* a été estimé à 2,5 mm/jr (0,28 m³/s), et à 3,0 mm/jr pour les deux autres stations hydrométriques, soit 1,27 m³/s pour Ostiguy et 6,43 m³/s pour Yamaska Nord. Ces *débites limites* sont utilisés dans la modélisation des flux de nutriments aux trois stations hydrométriques.

SÉDIMENTS

La concentration instantanée de l'eau en matières en suspension (MES) est aussi fortement influencée par le débit du cours d'eau. En règle générale, alors que le débit du cours d'eau s'accroît au-delà du *débit limite*, la concentration en MES augmente de façon exponentielle. Cette forte augmentation traduit la force érosive du ruissellement de surface à l'œuvre dans le bassin versant, de même que l'accroissement de la capacité de transport des sédiments du cours d'eau. À l'échelle d'un même événement de ruissellement, cependant, la quantité de sédiments charriés par le ruisseau est beaucoup plus élevée en montée de crue que pour le même débit du ruisseau en décrue. Ce phénomène d'hystérésis traduit la proportion relativement plus importante du ruissellement de surface en montée de crue qu'en décrue.

Les figures 13 à 15 illustrent la distribution dans le temps des flux de sédiments (MES) aux trois stations hydrométriques. Ces flux ont été estimés sur la base des données de turbidité colligées en continu (pas de temps de 15 minutes) par les sondes multi-paramètres installées dans les cours d'eau. Dans l'ensemble, les épisodes de précipitations liquides en hiver et la période de fonte du couvert hivernal contribuent à la plus large part des exportations annuelles de sédiments. La période estivale, malgré des précipitations plus abondantes que la normale en 2017, ne contribue que de façon marginale au bilan des exportations.

Tableau 5. Concentrations moyennes pondérées, charges annuelles et charges annuelles spécifiques (365 jrs, base ha) de calcium, de matières en suspension, d'azote et de phosphore estimées aux stations hydrométriques Yamaska Nord, Bouchard et Ostiguy.

	Yamaska Nord			Bouchard			Ostiguy		
	Concentration ¹ (ug/L)	Charge (kg/an)	Charge spécifique (kg/ha-an)	Concentration ¹ (ug/L)	Charge (kg/an)	Charge spécifique (kg/ha-an)	Concentration ¹ (ug/L)	Charge (kg/an)	Charge spécifique (kg/ha-an)
Ca	13 755	1 908 384	103	17 121	141 230	145	18 545	551 754	151
MES	8 865	1 222 848	66	13 860	113 958	117	9 902	295 974	81
P total	54,9	7 596	0,41	108,0	896	0,92	62,4	1 864	0,51
P biodisponible	33,1	4 632	0,25	74,1	614	0,63	38,4	1 133	0,31
P dissous	18,6	2 594	0,14	53,4	438	0,45	26,6	804	0,22
P ortho	14,2	2 038	0,11	43,5	360	0,37	20,6	621	0,17
NO₃	465	64 663	3,49	594	4 909	5,04	404	11 985	3,28
NH₄	148	20 566	1,11	159	1 315	1,35	79,3	2 339	0,64
P particulaire	36,3	5 003	0,27	54,6	448	0,46	35,8	1 060	0,29
P particulaire biodisponible	14,5	2 038	0,11	20,7	175	0,18	11,8	365	0,10
P particulaire non biodisponible	21,8	2 964	0,16	33,9	282	0,29	24,0	731	0,20
P organique dissous	4,4	556	0,03	10,0	78	0,08	6,0	183	0,05

¹ Concentration moyenne pondérée pour le débit du cours d'eau.

Tableau 6. Spéciation des formes de phosphore estimée pour les charges des trois bassins versants étudiés.

Ratios	Yamaska Nord	Bouchard	Ostiguy
P particulaire / P total	0,66	0,51	0,57
P dissous / P total	0,34	0,49	0,43
P biodisponible / P total	0,60	0,69	0,61
P réactif soluble / P total	0,26	0,40	0,33
P part. biod. / P particulaire	0,40	0,38	0,33
Richesse Psed (ug/g)	4 089	3 938	3 617

Dans l'ensemble, les charges annuelles de sédiments observées aux stations hydrométriques, comprises entre 66 et 117 kg MES/ha-an, demeurent relativement faibles comparées aux taux d'exportation mesurés dans d'autres micro-bassins versants de la Montérégie à vocation agricole (Michaud et al., 2005, 2009a, 2009b, 2012). La prédominance de l'occupation forestière du territoire et l'importance des superficies en fourrages pérennes sur le territoire en culture expliquent ces taux dans la fourchette inférieure des flux de sédiments documentés en Montérégie. Il est important de rappeler ici que ces charges sont principalement tributaires de deux phénomènes, soit des processus d'érosion des sols à l'œuvre sur l'ensemble du territoire, de même que des processus de sédimentation dans les cours d'eau, les milieux humides, les lacs et les réservoirs.

La charge de sédiments plus importante observée à l'exutoire du ruisseau Bouchard (117 kg MES/ha-an) traduit

manifestement une activité érosive plus importante dans ce sous-bassin versant que dans l'Ostiguy (81 kg MES/ha-an) et la Yamaska Nord (66 kg MES/ha-an). La superficie beaucoup plus faible du bassin Bouchard favorise également la capacité de transport des sédiments, depuis les zones d'émission jusqu'à la station hydrométrique. L'occupation agricole relativement plus importante et l'intensité de l'activité hydrologique de surface, abordée précédemment, contribueraient aussi à expliquer cet important contraste dans les exportations de sédiments.

La charge spécifique de sédiments du bassin Ostiguy demeure pour sa part inférieure à celle du bassin Bouchard (tableau 5), et ce malgré un relief plus accidenté qui prédisposerait en principe à des taux d'érosion plus élevés. Les conditions propices à la sédimentation en zone aval du sous-bassin, telles qu'observées à la station hydrométrique, influenceraient à la baisse le flux de sédiments qui y a été estimé. Enfin, le flux spécifique de sédiments observé à la station de la Yamaska Nord (66 kg MES/ha-an), qui se situe en deçà des deux autres stations, traduit assurément un effet du réservoir Choinière sur la sédimentation des matières en suspension charriées par la rivière depuis l'amont.

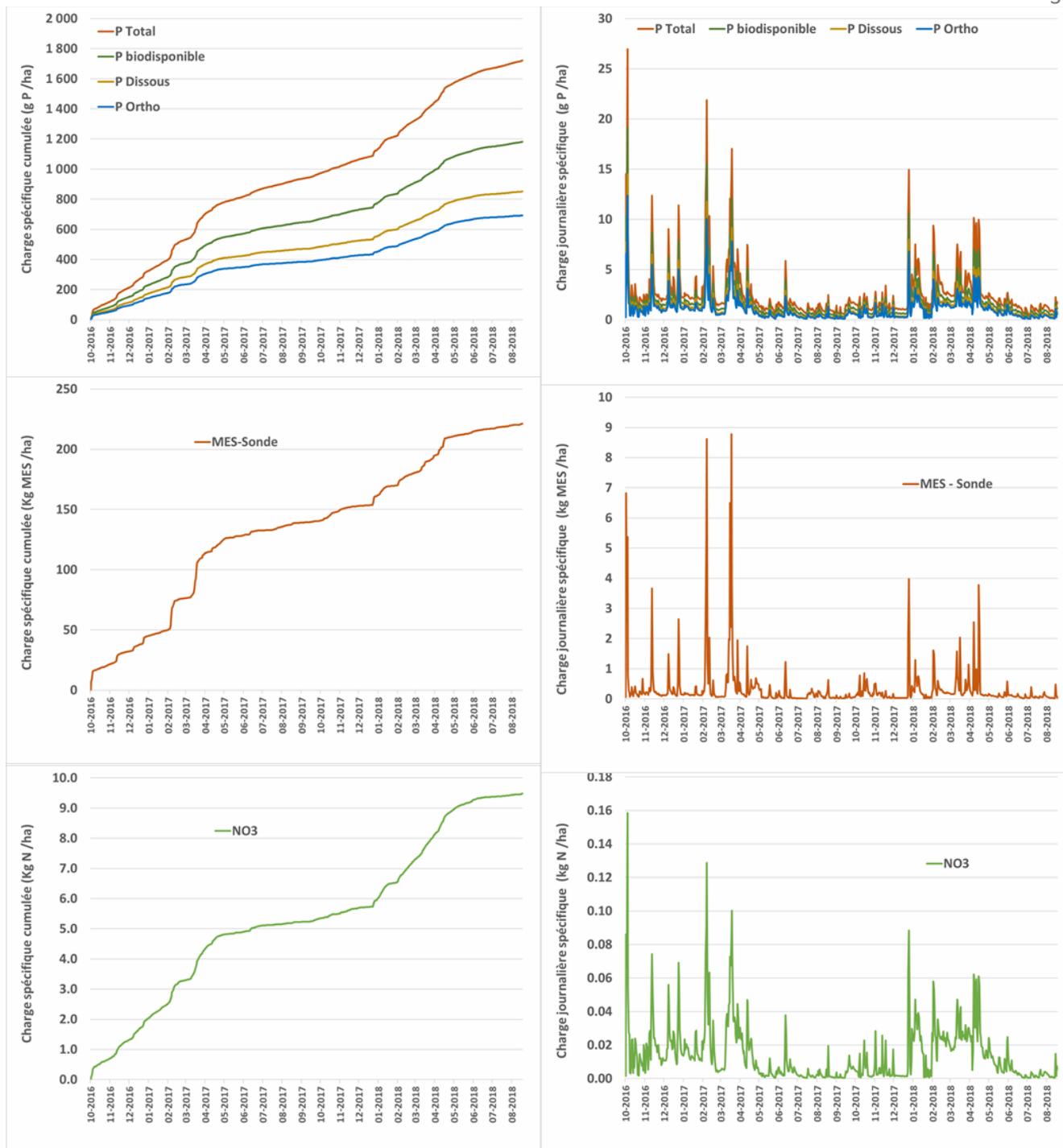


Figure 13. Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, des différentes formes de phosphore et des nitrates à la station hydrométrique du ruisseau Bouchard.

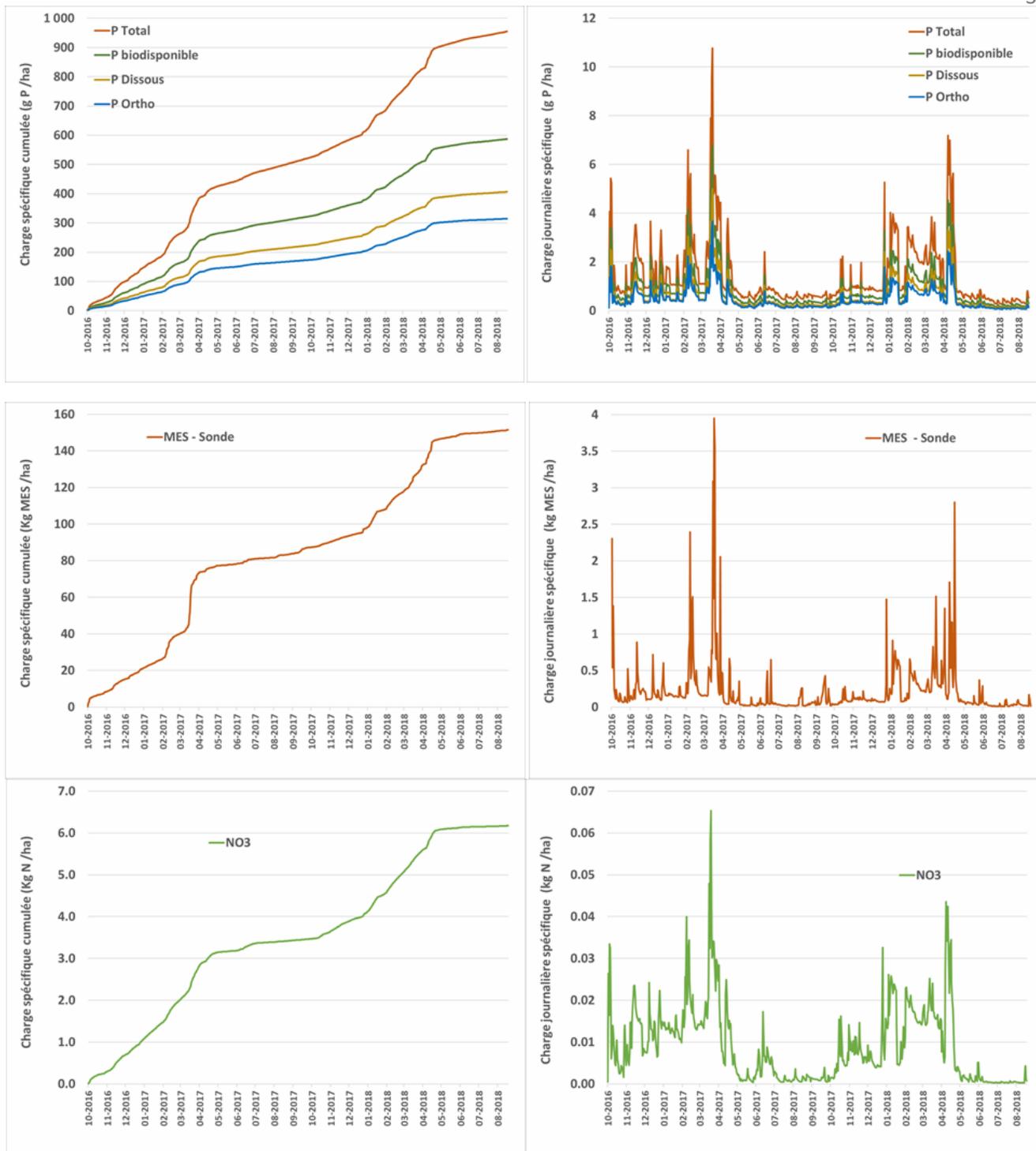


Figure 14. Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, des différentes formes de phosphore et des nitrates à la station hydrométrique du ruisseau Ostiguy.

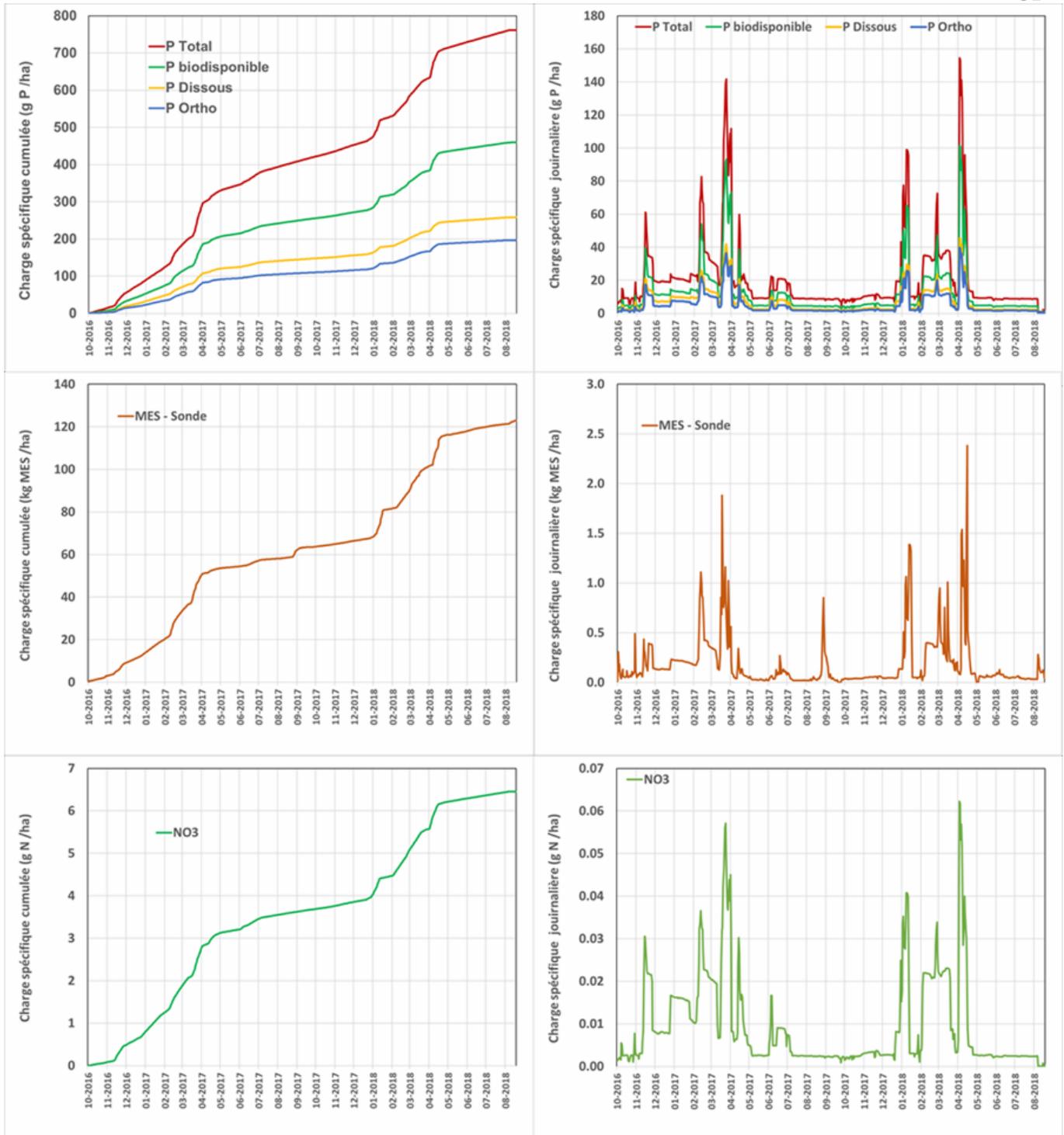


Figure 15. Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, des différentes formes de phosphore et des nitrates à la station hydrométrique de la rivière Yamaska Nord.

PHOSPHORE

Globalement, le flux spécifique annuel de phosphore total estimé à la station du ruisseau Bouchard (0,92 kg P/ha-an) est près du double de celui estimé pour les deux autres stations à l'étude, soit de 0,41 et 0,51 kg P/ha-an aux bassins Yamaska Nord et Ostiguy (tableau 6). Ce taux traduit manifestement une vulnérabilité beaucoup plus élevée du bassin versant du ruisseau Bouchard aux exportations de phosphore. L'occupation agricole du sol relativement plus importante (tableau 3) et une activité hydrologique plus intense qu'aux sous-bassins Ostiguy et Yamaska Nord contribueraient à expliquer cette vulnérabilité. Si le bassin versant se distingue à la hausse quant aux quantités de P exportées, il se distingue aussi sur les formes de phosphore exporté. En effet, le protocole de dosage des différentes formes de phosphore appliqué dans le cadre de la présente étude a mis en relief que le P observé à la station Bouchard présente des proportions relativement plus importantes de phosphore biodisponible et de phosphore réactif dissous (figure 16; tableau 5). En fait, la moitié (49 %) du P exporté à l'exutoire du bassin Bouchard est sous forme dissoute (cumul des composantes réactive et organique), contre 34 % à 43 % pour les bassins Yamaska Nord et Ostiguy (tableau 6). Cette proportion relativement élevée de P dissous fait en sorte que l'indice de biodisponibilité globale du P exporté du bassin Bouchard atteint 69 % du P total exporté. Cet indice a une implication environnementale importante, puisqu'il traduit la part de la charge totale de P qui est susceptible d'être assimilée par les plantes et les microorganismes du plan d'eau, et ainsi d'accélérer le processus d'eutrophisation du lac Boivin.

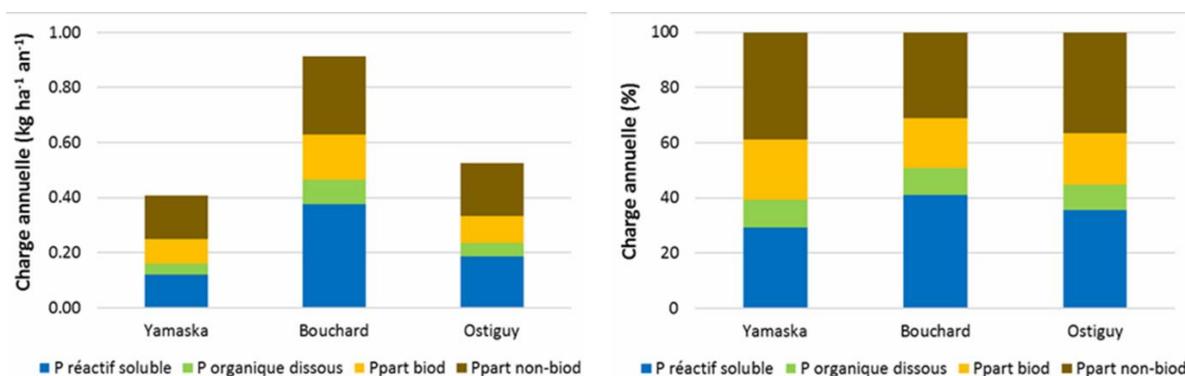


Figure 16. Charges et spéciation des formes de phosphore observées aux exutoires des trois bassins versants à l'étude.

En prenant en considération les flux de MES de même que la spéciation des formes de P exporté, il devient possible d'exprimer la richesse des sédiments en P, de même que la biodisponibilité du phosphore contenu dans les sédiments. Sur la base de ces estimations, il s'avère que la richesse moyenne en P des sédiments varie de 3 617 ug/g à la station Ostiguy à 4 089 et 3 938 ug/g aux stations Yamaska Nord et Bouchard, respectivement. Les indices de biodisponibilité du P particulaire (ratio P particulaire biodisponible/P total) demeurent dans un ordre similaire de grandeur, soit de 33 % à 40 % (tableau 6).

L'enrichissement de l'eau de surface en fractions dissoutes et réactives du phosphore traduit généralement des apports de P relativement plus élevés par unité de surface, et l'enrichissement des sols en P qui en découle. Cette relation a été bien établie pour les sols du Québec (Giroux et al., 2008) et est à la base des principes de fertilisation intégrée des cultures. Une implication pratique de la spéciation du P observée à la station Bouchard est que la charge annuelle relativement plus élevée de P total est imputable en partie à des apports de P et un enrichissement des sols relativement plus important que dans les sous-bassins Ostiguy et Yamaska Nord.

NITRATES

Les charges annuelles spécifiques de nitrates estimées sont de l'ordre de 3,28 kg N/ha, 3,49 kg N/ha et 5,04 kg N/ha aux stations Ostiguy, Yamaska Nord et Bouchard, respectivement (tableau 5). Les concentrations moyennes pondérées pour le débit, de l'ordre de l'ordre de 404 ug N/L à 594 ug N/L se situent en deçà des niveaux rapportés pour d'autres bassins de la Montérégie (Michaud et al., 2005, 2009a, 2009b, 2012). Ces deniers sont cependant associés à des occupations agricoles relativement plus importantes et à des vocations plus intensives. La dominance de l'occupation forestière des territoires des trois sous-bassins versants du lac Boivin à l'étude explique ces flux de nitrates relativement peu élevés par rapport aux observations régionales. La distribution saisonnière des concentrations en nitrates témoigne cependant de taux relativement élevés en périodes automnales tardives et hivernales dans les trois bassins à l'étude (figures 13 à 15). Typiquement, en milieu naturel, les concentrations en nitrates diminuent en période hivernale, reflétant un ralentissement dans les processus de nitrification dans les sols et l'eau de surface. Des concentrations soutenues de nitrates en période hivernale dans les trois sous-bassins à l'étude est ici un indicateur de stock d'azote disponible en fin de saison de croissance des cultures. Ces reliquats de fertilisation azotée sont mobilisés graduellement en période de recharge de la nappe, depuis la fin de l'automne jusqu'à la crue printanière.

Similairement au gradient observé dans les flux dissous de phosphore entre les sous-bassins, des concentrations de nitrates relativement plus élevées à la station Bouchard traduisent un apport plus marqué en azote, imputable en partie à l'occupation agricole relativement plus importante du sous-bassin. Une implication pratique de ces concentrations hivernales en nitrates est l'indication de gains potentiels pour le secteur agricole de l'ensemble du territoire à récupérer la pleine valeur fertilisante des engrais de ferme et minéraux apportés sur les terres.

3.2.5 Résultats des campagnes d'échantillonnage spatial du ruisseau Bouchard

La vulnérabilité plus élevée du ruisseau Bouchard aux exportations de phosphore, comparées à celles observées pour le ruisseau Ostiguy et la rivière Yamaska Nord, a motivé une étude plus approfondie de son bassin versant. Dix-neuf campagnes d'échantillonnage ont ainsi été réalisées, pratiquement de façon simultanée, sur les branches amont du ruisseau Bouchard entre 2016 et 2020. Le tableau 6 rapporte les moyennes des concentrations observées pour les différents paramètres de qualité de l'eau (MES, PO, N, Ca et K), de même que la détection de différences significatives entre les quatre stations à l'étude résultant de l'analyse de variance de l'ensemble des données. L'analyse met également en relief les résultats de deux périodes distinctes d'échantillonnage spatial, soit la période 2016-2018, commune aux suivis des stations Ostiguy et Yamaska Nord, et la période 2019-2020. Rappelons que la station n° 1, localisée à l'exutoire du bassin versant, correspond à la station hydrométrique principale, dont les résultats du suivi hydrologique 2016-2018 ont été présentés antérieurement. La station Témoin est localisée à l'amont du de la branche Est du bassin versant et témoigne d'une occupation principalement forestière du territoire. Les stations d'échantillonnage n° 2 et n° 3 sont pour leur part représentatives des sous-bassins de la branche Ouest et Est du ruisseau Bouchard, et cumulent la majeure partie de l'occupation agricole du bassin versant (figure 17). L'occupation agricole de l'ensemble de la zone d'étude est dominée par prairie, et ce pour toute la période d'étude 2016-2020. Seul le sous-bassin de la station 3 (Branche Est) est occupé en partie par des cultures annuelles, soit entre 31 et 34 hectares de maïs grain et/ou de soya en 2016, 2017 et 2019 (Figure 17).

Gradient inter-périodes. Les distributions dans les concentrations des différents paramètres de qualité de l'eau témoignent d'un contraste marqué entre les deux périodes de suivis. Les concentrations observées en MES, nitrates et phosphore se distinguent en effet nettement à la hausse pour la période 2019-2020. Les débits observés du ruisseau n'expliquent pourtant pas ce gradient. Dans les faits, cinq campagnes de 2016-2018, sur un total de 12, ont été réalisées en situation de débits élevés, supérieurs à 0,5 m³/s, alors que toutes les campagnes de 2019-2020 ont été réalisées à des débits inférieurs. Cette relative insensibilité des paramètres de qualité de l'eau au débit du

ruisseau, notamment pour les MES et le phosphore, considérés généralement sensibles aux conditions hydrologiques, témoigne d'une faible vulnérabilité du parcellaire agricole à l'érosion des sols. Une occupation du parcellaire en culture sol dominée par la prairie expliquerait ces observations.

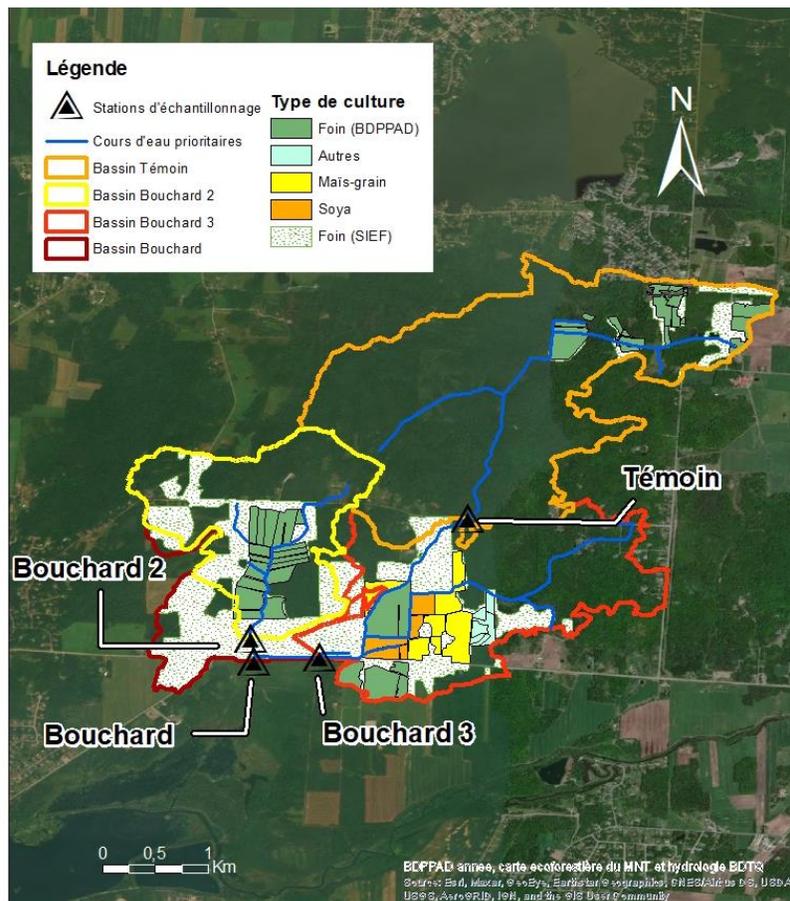


Figure 17. Occupation du territoire du bassin versant du ruisseau Bouchard.

Par contre, les concentrations observées en phosphore total, telle qu'illustré en figure 18, sont plutôt indicatrices de l'influence de la saisonnalité sur le gradient inter-période s valeurs observées. En effet, trois campagnes révèlent des concentrations particulièrement élevées en P total (> 600 mg P/L), soit à l'automne 2019 et au début d'août 2020. Une implication pratique de ce gradient significatif entre les périodes d'échantillonnage 2016-2018 et 2019-2020 est que les transferts de phosphore ont été plus influencés par le calendrier des opérations culturales, notamment celui des apports d'engrais de ferme, que l'activité hydrologique dans le bassin versant.

Gradient inter-stations. L'absence de différence significative entre les concentrations observées en MES des stations no. 1, 2 et 3 par rapport à la station Témoin, témoignent également de la faible vulnérabilité du parcellaire en culture aux processus érosifs. La moyenne des concentrations du sous-bassin Témoin est certes inférieure aux autres sous-bassins influencés par l'occupation agricole, mais cette différence demeure néanmoins non significative. Cette absence de gradient spatial significatif témoigne aussi vraisemblablement de la forte variabilité temporelle des concentrations en MES attribuables aux cycles rapides de crue et décrue, et aux phénomènes de sédimentation et de remise en suspension des sédiments qui en découlent. La faible superficie des sous-bassins versants à l'étude exacerbe en effet l'effet d'hystérésis (concentration plus faible en décrue qu'en crue) sur les concentrations en MES, tel que mis en relief par les relevés de la sonde de turbidité à la station hydrométrique principale du ruisseau Bouchard (figure 7).

Contrairement aux observations de MES et de P total, tous les paramètres de phosphore réactif (biodisponible, dissous et ortho-phosphates) des stations sous occupation agricole se distinguent significativement à la hausse par rapport à la station Témoin. Ces gradients inter-stations dans les formes solubles et réactives de P tendent également vers une explication par des sources de phosphore, plutôt que vecteurs de transport par ruissellement et érosion. Les concentrations significativement plus élevées en P soluble et réactif dans la branche Ouest (station no.2) que dans la branche Est du ruisseau (station no.3) témoignent vraisemblablement du même phénomène. En effet, le sous-bassin de la station no. 3 concentre toute la production de cultures annuelles (maïs grain et soja) de l'ensemble du bassin versant. La concentration moyenne observée y demeure néanmoins significativement inférieure à celle du sous-bassin no.2, cultivé en totalité en prairie. Le gradient observé favorisant les formes solubles et réactives de P du bassin de la Branche Ouest s'explique vraisemblablement par un contraste dans les sources de phosphore, en lien avec l'enrichissement des sols et les modalités d'apports des engrais de ferme et minéraux. Le taux significativement plus élevé de potassium observé dans la branche Ouest qu'aux stations de la branche Est est également un indicateur d'apport relativement plus important de nutriments hérités des engrais de ferme.

Enfin, l'analyse de la variabilité des concentrations en nitrates ne démontre pas de différences significatives entre les sous-bassins 1, 2 et 3, avec des valeurs moyennes, de l'ordre de 625 à 654 ug N/L. Ces teneurs témoignent cependant d'un enrichissement significatif ($p < 0,05$) par rapport à la station Témoin (159 ug N/L). Ces concentrations demeurent relativement faibles par rapport aux observations colligées dans d'autres bassins versants de la Montérégie. Par exemple, les concentrations moyennes en nitrates pondérées pour le débit de quatre micro-bassins de la rivière aux Brochets (8 à 30 km²) se situent entre 3 100 et 8 000 ug N/L. (Michaud et al., 2005, 2009a, 2009b; Madramootoo et al., 2012). Il faut noter cependant que ces derniers ont une occupation du sol dominée par l'agriculture, de même que des systèmes culturaux plus intensifs.

Tableau 6. Moyennes des concentrations (ug/L) en matières en suspension, nitrates et différentes formes de phosphore, ajustées au modèle d'analyse de la variance des observations colligées aux quatre stations d'échantillonnage spatial du ruisseau Bouchard en période de crue.

Effet du site	Concentrations moyennes (ug/L) ajustées au modèle de variance							K
	Ca	MES	P total	P Biod.	P Dissous	P Ortho-	NO3	
Aval (1)	19 017 a	19 011 a	161 a	112 a	77 a	61 a	625 a	2 281 a,b
Br. Ouest (2)	21 539 a	8 164 a,b	143 a	115 a	94 a	80 a	648 a	3 149 a
Br. Est (3)	17 312 a	7 514 a,b	106 a	70 bc	42 b	34 b	654 a	1 849 b
Témoin	9 464 b	5 956 b	55 b	28 b	10 c	8 c	159 b	667 c
Effet de la période								
2016-2018	13 891 a	3 454 a	72 a	45 a	28 a	21 a	303 a	1 365 a
2019-2020	18 649 a	24 129 b	161 b	111 b	63 b	55 b	676 b	2 180 b

Les moyennes suivies de lettres distinctes sont significativement différentes au seuil de $p < 0,05$.

3.3 CONCLUSION DU VOLET DE SUIVI HYDROMÉTRIQUE

La mise en œuvre des suivis hydrométriques aux trois stations à l'étude a permis de caractériser et de différencier les réponses hydrologiques des bassins Bouchard, Ostiguy et Yamaska Nord. Malgré l'influence de retenues d'eau ou du refoulement dans les bassins Ostiguy et Yamaska Nord, leurs charges respectives de sédiments, de phosphore et d'azote ont été estimées de façon satisfaisante, respectant les critères ciblés d'ajustement des modèles statistiques. Cette qualité dans l'ajustement des modèles sur une période de deux ans est redevable en grande partie à l'assiduité dans l'échantillonnage et les mesures de débit lors des crues des cours d'eau. Ces estimations permettent d'établir les apports de sédiments et de nutriments au lac Boivin. Sur la base du cumul des charges des bassins Bouchard et Yamaska Nord, la charge de sédiments au lac est estimée à 1 346 tonnes métriques par année, alors que la charge annuelle de phosphore total est de l'ordre de 8,52 tonnes métriques, et de 5,22 tonnes métriques pour le P biodisponible. En traduisant ces flux en concentrations annuelles pondérées pour le débit, des

concentrations de l'ordre de 57,5 ug P/L pour le phosphore total et de 35,2 ug P/L pour le phosphore biodisponible sont obtenues. Ces balises sont utiles dans l'établissement éventuel de charges cibles de nutriments vers le lac Boivin et la planification d'actions environnementales permettant de rencontrer ces dernières. Une cible de 30 ug P/L de concentration en P total, pondérée pour le débit, impliquerait par exemple une réduction de l'ordre de 48 % de la charge actuelle de P. Les flux et concentrations mesurées dans le cadre de la présente étude pourront par ailleurs s'avérer utiles dans la mesure de la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales entreprises dans le bassin versant. À terme, de nouvelles campagnes de suivi hydrométrique devront suivre une méthodologie similaire, notamment la collecte d'un nombre élevé d'observations de qualité de l'eau en période de crue des cours d'eau.

Enfin, soulignons que les charges spécifiques de sédiments et de nutriments estimées pour le territoire à l'étude demeurent, toutes proportions gardées, relativement peu élevées en comparaison des relevés similaires réalisés dans d'autres sous-bassins de la Montérégie. L'occupation forestière du territoire et la dominance des prairies dans l'occupation agricole du bassin versant expliquent cette pression modérée au plan environnemental. La situation du bassin Bouchard est cependant plus préoccupante, du fait de l'importance et de la nature soluble des charges de phosphore. Dans l'ensemble, la distribution des flux de sédiments des formes de P pour le bassin versant du lac Boivin met particulièrement en relief la pertinence d'actions d'accompagnement agroenvironnemental ciblées sur le contrôle de l'enrichissement des sols en phosphore et des modalités d'apports d'engrais de ferme et minéraux.

4. VOLET D'ÉTUDE EN MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

Les sections suivantes du rapport présentent la méthodologie et les résultats de la modélisation hydrologique du risque d'exportation de phosphore réalisée à l'échelle du bassin versant du lac Boivin et de l'ensemble du territoire de la MRC de La Haute-Yamaska. L'exercice de modélisation a été réalisé avec le support du méta-modèle GÉODEP (Outil de diagnostic spatialisé des exportations de phosphore; Michaud et al., 2008, Drouin et al., 2014 et Michaud et al., 2018a). L'ensemble des données à référence spatiale utilisées en support à la modélisation, de même que les résultats représentatifs des différents portraits de gestion du territoire agricole sont intégrés dans un système d'information géographique (SIG) à haute résolution (1 m) et mis à la disposition des promoteurs du projet.

L'exercice de modélisation a été réalisée en trois étapes :

Étape 1 : Scénario particulier de gestion agricole à l'échelle du bassin versant du lac Boivin.

Un premier exercice a porté sur l'ensemble du bassin versant du lac Boivin, incluant les bassins sous suivis hydrométriques de la rivière Yamaska Nord et des ruisseaux Bouchard et Ostiguy. Cette modélisation à l'échelle du bassin versant du lac Boivin met à profit les données de gestion à l'échelle du parcellaire, ci-après désigné *Scénario particulier*, colligées pour la plupart des entreprises agricoles du bassin versant par les équipes de l'OBV Yamaska et du club conseil Gestrie-Sol (Labrie et al., 2018). Cette caractérisation fine de la régie des sols et des cultures s'inscrit dans une dynamique d'action concertée de l'OBV et du club conseil sur la qualité de l'eau du lac Boivin et de ses affluents en collaboration avec les entreprises agricoles de la région d'étude.

Étape 2 : Scénario alternatif de gestion agricole à l'échelle du bassin versant du lac Boivin.

Une modélisation des flux de sédiments et de phosphore a également été générée sur la base d'un *Scénario alternatif de gestion* à l'échelle du bassin versant du lac Boivin. Cet exercice a permis d'évaluer les capacités du modèle à projeter les réponses de la qualité de l'eau à l'introduction de diverses pratiques de conservation des sols et d'aménagement des terres sur le territoire en culture. Le *simulateur de scénarios agroenvironnementaux* (SiSA) inhérent au module 8 de GÉODEP permet à l'utilisateur de générer sur mesure des projections d'exportations de sédiments et de phosphore suivant d'autres scénarios alternatifs de gestion appliqués à différents secteurs ciblés du bassin versant.

Étape 3 : Scénario de référence à l'échelle de la MRC de La Haute-Yamaska.

Un troisième exercice de modélisation a également été réalisé à l'échelle de l'ensemble du territoire de la MRC de La Haute-Yamaska. Sept sous-bassins versants (figure 18) ont ainsi été caractérisés dans GÉODEP, qui s'ajoutent aux résultats de simulation des sous-bassins versants du lac Boivin. Un scénario généralisé de régie des sols et des cultures, ci-après désigné *Scénario de référence*, a alors été généré pour l'ensemble du territoire en culture couvert par ces sous-bassins. Ce scénario de référence est en fait une projection des régies documentées par classes de culture pour le bassin versant du lac Boivin, qui se voient distribuées aux sept sous-bassins versants à l'étude.

Les sections suivantes du rapport présentent d'abord le modèle et ses paramètres d'entrée. Les résultats de la modélisation GÉODEP sont ensuite présentés successivement à l'échelle des sous-bassins versants du bassin versant du lac Boivin (*Scénarios particulier et alternatif*), puis à celle de la MRC de La Haute-Yamaska (*Scénario de référence*).

4.1 OBJECTIFS

L'objectif principal du volet hydrologique de l'étude de caractérisation du bassin versant du lac Boivin et de la MRC de La Haute-Yamaska est d'appuyer les initiatives de mise en valeur des plans d'eau et des bassins versants en représentant la vulnérabilité du territoire aux transferts de sédiments et de phosphore vers les cours d'eau. De façon plus spécifique, ce volet du projet intègre un ensemble d'informations à référence spatiale sur les propriétés des paysages du bassin versant et ses activités humaines afin de :

- localiser et quantifier les risques d'exportation diffuse de sédiments et de phosphore pour l'ensemble du territoire à l'étude;
- projeter les réponses de la qualité de l'eau à différents scénarios de gestion du parcellaire agricole sur le devenir des exportations de sédiments et de phosphore.

4.2 MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS

L'outil géospatial GéODEP a été utilisé en support à la caractérisation du risque d'exportation de phosphore du bassin versant du lac Boivin et de la MRC de La Haute-Yamaska. GéODEP consiste en une version spatialisée de l'ODEP (Outil de diagnostic des exportations de phosphore) développé antérieurement par l'équipe scientifique de l'IRDA en collaboration avec la commission de la fertilité des sols du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) (Michaud et al., 2008). Concrètement, les différents modules de GéODEP mettent à profit les banques de données géospatiales généralement disponibles en milieu rural au Québec (ex : données d'élévation, pédologie, plans de culture, etc.), de même que des données pertinentes à la régie des sols et des cultures, afin de produire des estimations de hauteurs d'eaux ruisselées et drainées, de même que des taux d'exportation de sédiments et de phosphore. GéODEP reprend essentiellement les algorithmes développés et validés lors de la conception de l'ODEP. Un module supplémentaire a cependant été développé dans le cadre de la présente étude et intégré au code source de GéODEP. Le module projette l'effet des épandages non incorporés d'engrais de ferme sur l'enrichissement du ruissellement de surface en phosphore réactif. Le développement de ce module de calcul s'est avéré nécessaire dans le contexte de la présente étude, afin de traduire l'effet des superficies dominantes en semis direct et en prairies sur l'enrichissement évènementiel du ruissellement de surface en phosphore. Les algorithmes du module, développés sur la base d'observations colligées sous simulateur de pluie en Montérégie Est (Michaud et Laverdière, 2004), sont présentés en annexe B. Pour plus d'informations sur le fonctionnement et les bases théoriques de GéODEP, le lecteur est invité à se référer aux manuels de l'utilisateur des outils ODEP et GéODEP (Drouin et al., 2014; Michaud et al., 2008; Michaud et al., 2018a).

Le système d'information à référence spatiale réalisé en principal livrable du projet inclut toutes les données géospatiales mises à profit dans la réalisation de l'étude et l'ensemble des résultats de la modélisation, incluant :

- L'ensemble des données utilisées dans le paramétrage du modèle et pertinentes aux propriétés géophysiques du territoire et de son occupation;
- Les données de régie des sols et des cultures colligées pour les entreprises agricoles du bassin versant du lac Boivin (Scénarios particulier et alternatif), de même que pour le reste du territoire de la MRC (Scénario de référence);

- La cartographie des parcours de l'eau à haute résolution de l'ensemble du territoire de la MRC et ses données dérivées utilisées dans l'indexation des hauteurs de ruissellement et du risque d'érosion;
- Les résultats de simulations des exportations de sédiments et de phosphore associés aux scénarios particulier et alternatif à l'échelle du bassin versant du lac Boivin, de même qu'au scénario de référence appliqué au territoire de la MRC de La Haute-Yamaska (zones hors du bassin versant du lac Boivin).

En marge des projections de flux de sédiments et de nutriments en provenance du territoire en cultures, l'étude comprend également une projection des flux de sédiments provenant des occupations non agricoles du territoire, incluant le réseau de routes. Les exportations diffuses de phosphore de la portion non agricole du territoire ont été projetées sur la base de coefficients d'exportation de P dérivés de la littérature scientifique.

Les méthodes et résultats pertinents à la projection par GÉODEP des flux de sédiments et de phosphore sont présentés en sections suivantes du rapport. La zone d'étude caractérisée à haute résolution (1m) couvre l'ensemble du territoire de la MRC de La Haute-Yamaska (71,697 ha), incluant le bassin versant du lac Boivin (21 109 ha). Les flux de sédiments et de phosphore projetés pour les bassins affluents du lac Boivin, soit le ruisseau Ostiguy (3 652 ha), le ruisseau Bouchard (974 ha) et la rivière Yamaska Nord (18 527 ha), ont été agrégés pour les fins de comparaison avec les résultats des suivis hydrométriques.

4.2.1 Paramétrage du modèle

La représentation du risque d'exportation de sédiments et de nutriments réalisée avec le support de GÉODEP est fondée sur l'intégration de deux ensembles d'informations, soit celles pertinentes aux propriétés des sols et des paysages (données géophysiques), de même que celles décrivant l'occupation des sols et leur gestion. L'étape de paramétrage du modèle GÉODEP consiste à mettre en forme et intégrer l'ensemble de ces données dans un système d'information géographique (SIG) commun. Les données pertinentes à chacune de ces couches d'information à référence spatiale sont par la suite structurées de façon à alimenter les différents modules de calcul du modèle et à générer les résultats de prédiction hydrologique. La description des différents modules et leurs bases théoriques sont décrites plus en détail par Drouin et al. (2014) et Michaud et al. (2008; 2018a).

Pour les fins de la présente étude, les principales données à référence spatiales suivantes ont été utilisées en support à l'application de GÉODEP :

- Les polygones de la banque de données des cultures assurées ou généralisées de l'année en cours et de l'année précédente (La Financière agricole du Québec, 2017);
- Les polygones de la carte écoforestière du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2010);
- Les polygones des rapports pédologiques de la zone d'étude (IRDA);
- Le relevé d'élévations à haute résolution LiDAR (Géomont, 2012);
- L'hydrographie surfacique et les cartes de base du Ministère des Ressources naturelles du Québec (BDTQ) et de Ressources naturelles Canada (Géobase).

RELIEF ET HYDROGRAPHIE

La délimitation des bassins versants et des sous-bassins versants à haute résolution a été réalisée à partir du modèle numérique d'altitude (MNA) dérivé du relevé LiDAR de 1 m de résolution (figure 17). Au préalable, le réseau hydrographique a été « brûlé » dans le SIG afin d'éliminer l'effet des ponceaux et assurer des parcours continus des écoulements, utilisés en intrants aux routines des calculs hydrologiques. Les directions et les accumulations des parcours de l'eau ont été colligées et regroupées en sous-bassins dont le seuil minimal de superficie a été fixé à 10 ha. La figure 18 illustre la délimitation des sous-bassins de même que le réseau hydrographique générés pour l'ensemble du bassin versant du lac Boivin et de la MRC de La Haute-Yamaska.

PÉDOLOGIE

La figure 19 illustre la distribution spatiale des séries de sol du territoire à l'étude. Globalement, les sols du bassin versant présentent des textures très diversifiées allant des textures sablonneuses fines en amont du bassin versant qui contrastent avec les textures plus lourdes de la portion aval du bassin. Chaque polygone de série de sols est documenté dans la banque de données hydro-pédologiques de l'IRDA (2018). Celle-ci décrit les propriétés des sols qui sont mises à profit dans les modules de calcul du ruissellement, de l'érosion et des exportations de phosphore. Les propriétés physico-chimiques des sols (texture, structure, perméabilité, taux de matière organique, teneur en P naturel du sol) de même que l'indexation de leur groupe hydrologique et leur indice d'érodabilité sont au nombre des propriétés déterminantes mises à profit par les algorithmes de calcul de GÉODEP. Enfin, les richesses moyennes des sols en phosphore assimilable (Mehlich-3) et les indices de saturation des sols en P des champs pour chacune des municipalités de la zone d'étude sont tirés de l'étude de Beaudet et al. (2009). Ces résultats de dosages des sols ont été répertoriés sur la base des rapports d'analyses préparés par les services de laboratoire à l'intention des agriculteurs, en support à l'élaboration de leurs plans de fertilisation des cultures. Pour la modélisation appliquée au bassin versant du lac Boivin, les richesses et la saturation du sol en phosphore colligées auprès des entreprises agricoles du bassin versant (Labrie et al., 2018) ont plutôt été utilisées et sont décrites ci-après.

OCCUPATION DU TERRITOIRE

Le scénario de référence de l'occupation des sols pour les sous-bassins de la MRC de La Haute-Yamaska a mis à profit deux banques de données à référence spatiale, soit la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD) de l'année en cours et de l'année précédente (La Financière agricole du Québec, 2017), de même que les polygones de la carte écoforestière (SIEF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2010). Afin de simplifier l'exercice de modélisation hydrologique, les classes détaillées d'occupation agricole (BDPPAD) et d'occupation non agricole du territoire (SIEF) ont été regroupées en classes généralisées d'occupation (figure 20).

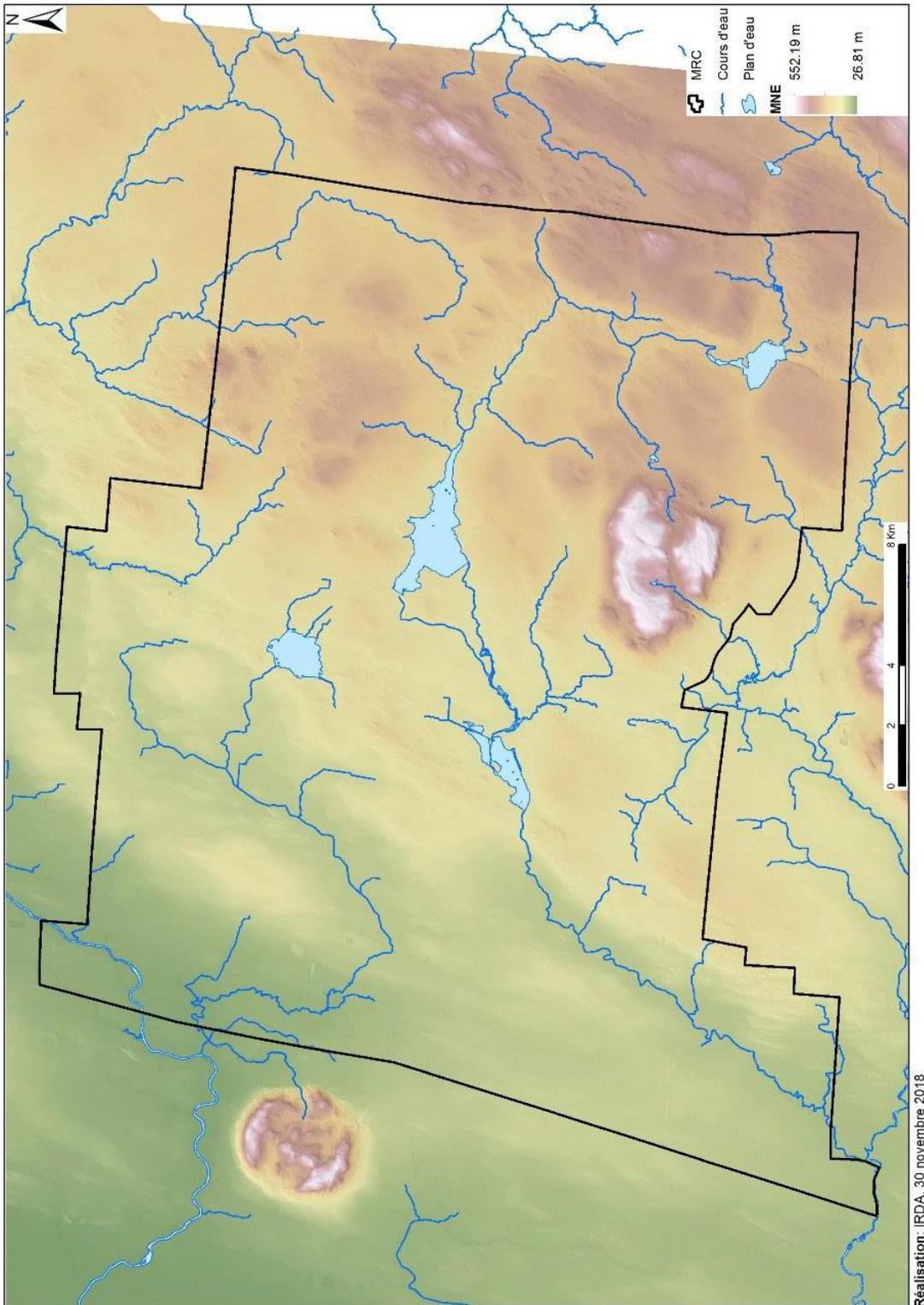


Figure 17. Modèle numérique d'élévation du territoire des sous-bassins versants à l'étude.

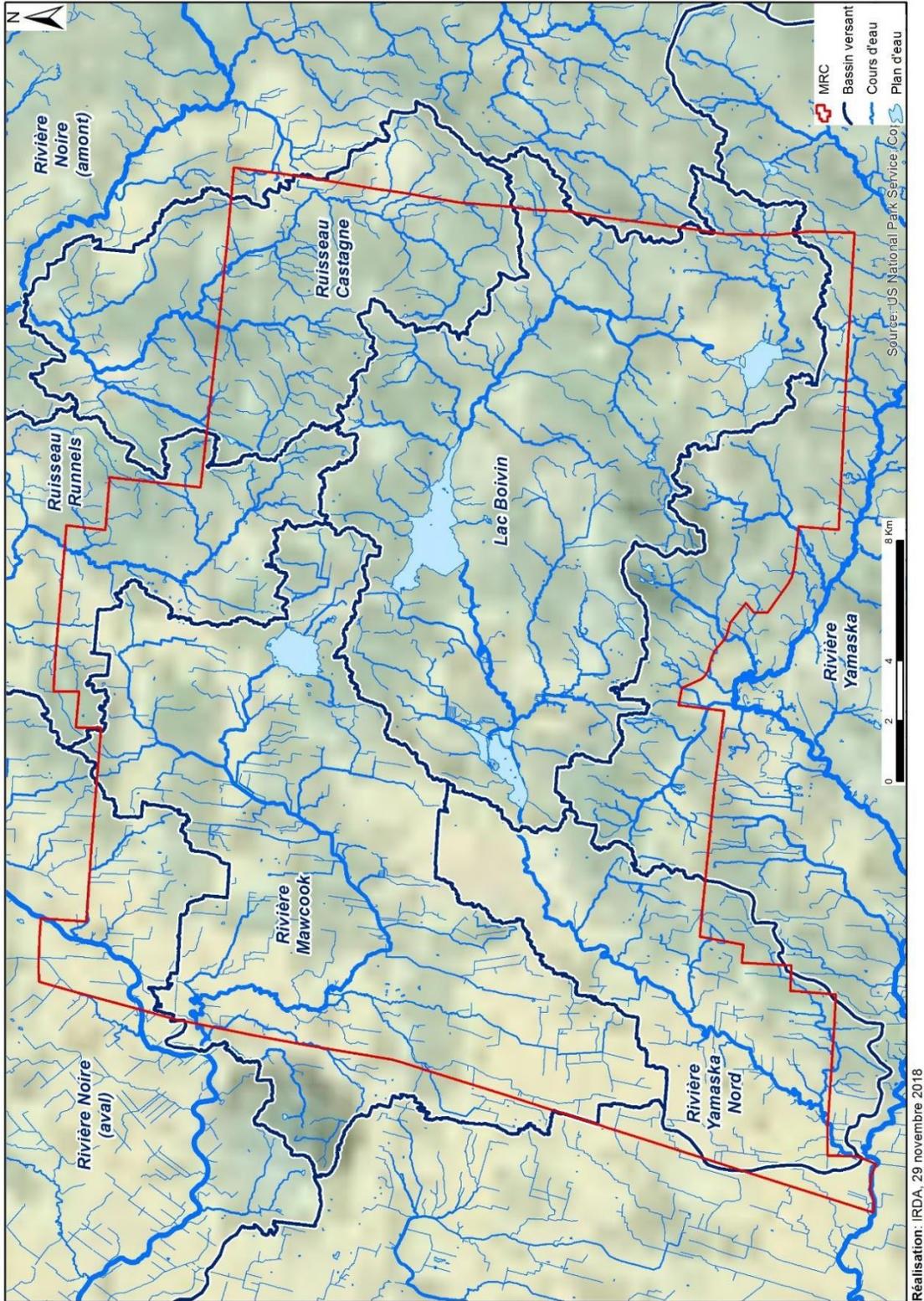


Figure 18. Hydrographie du territoire des sous-bassins versants à l'étude.

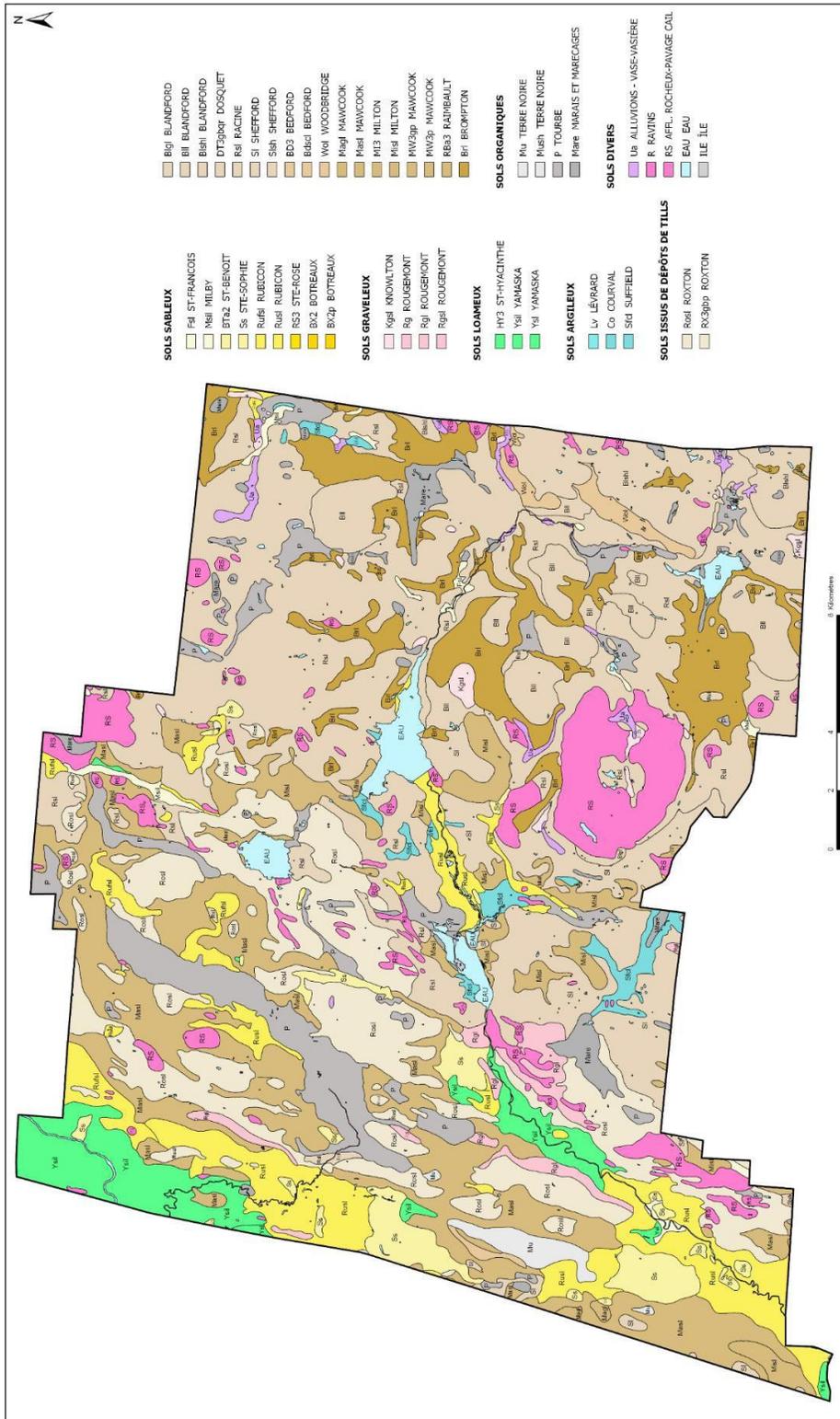


Figure 19. Pédologie du territoire des sous-bassins versants à l'étude.

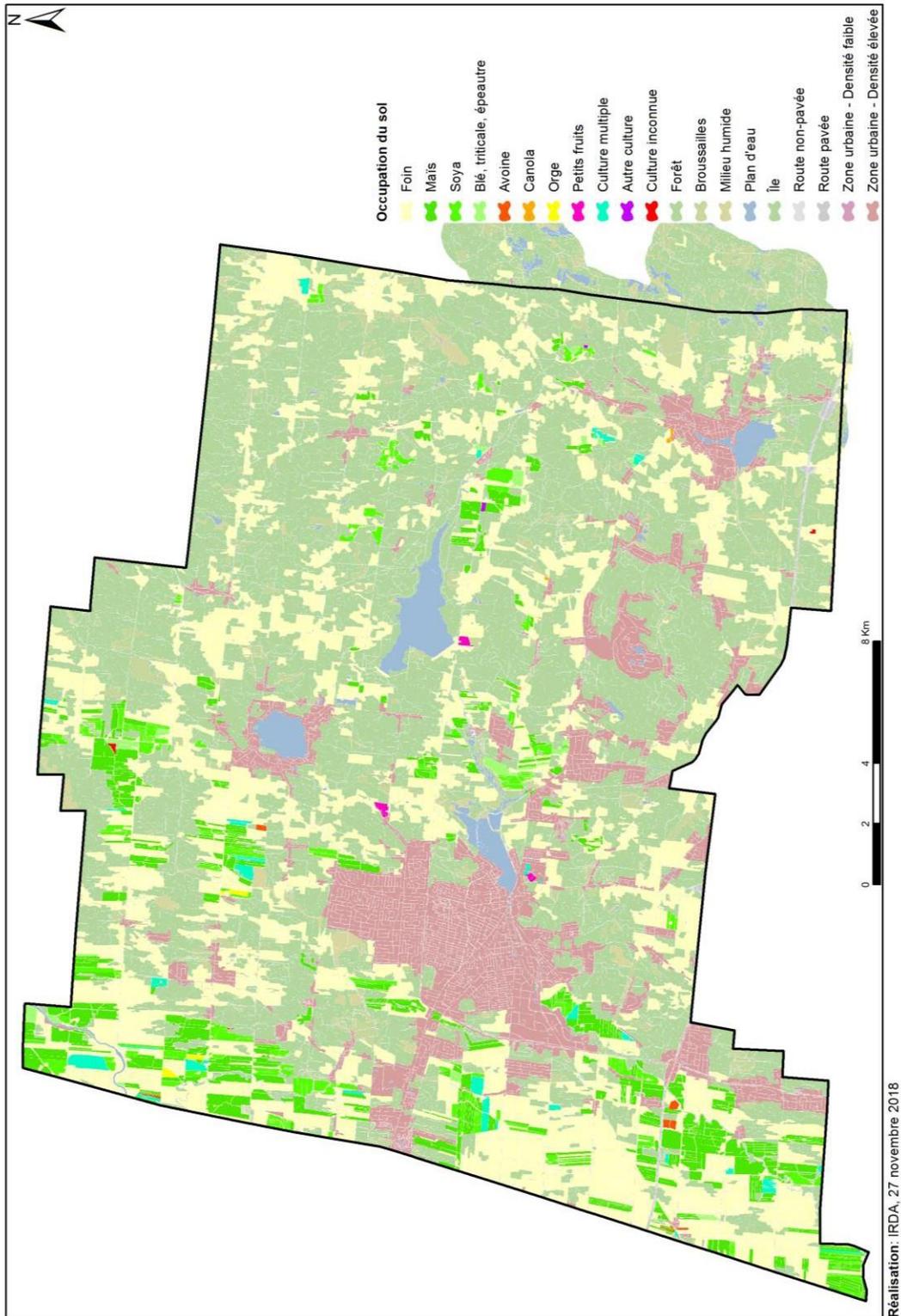


Figure 20. Occupation du territoire des sous-bassins versants à l'étude.

ANALYSE DES PARCOURS DE L'EAU ET GÉNÉRATION DU RISQUE D'ÉROSION

L'inclinaison et la longueur des parcours de l'eau sont des facteurs déterminants de l'intensité des processus d'érosion des sols. Le module de calcul du taux d'érosion de GéODEP utilise le modèle numérique d'élévation à haute résolution, dérivé du relevé LiDAR, afin de générer de façon précise les facteurs de longueur et d'inclinaison des parcours de l'eau qui seront mis à contribution dans la prédiction du taux d'érosion (Michaud et al., 2018a).

La démarche est supportée en plusieurs étapes, telles qu'illustrées en figure 21. Dans un premier temps, les polygones de parcours de l'eau sont générés par l'intersection spatiale des sous-bassins, des cours d'eau et des fossés (limites des parcelles agricoles ou réseau de routes). En second lieu, une analyse spatiale des parcours de l'eau dans chacun des polygones de parcours de l'eau permet d'y identifier le parcours de l'eau le plus long. Les statistiques de longueur et d'inclinaison de la pente sont alors générées sur chacun de ces parcours. Ces propriétés de l'écoulement sont par la suite utilisées en intrants dans le calcul du facteur topographique LS, descriptif de la vulnérabilité du relief au processus d'érosion, suivant la méthode proposée par Wall et al. (2002).

Les unités de parcours de l'eau sont par la suite croisées avec les polygones de la carte pédologique (propriétés des sols) afin de générer, au plan spatial, les Unités de Réponses Hydrologiques Homogènes (URHH). C'est à l'échelle de ces unités que seront calculées et représentées toutes les sorties de GéODEP pertinentes à l'indexation du risque de ruissellement, d'érosion et d'exportation de phosphore.

SCÉNARIOS DE GESTION DU PARCELLAIRE

ODEP et GéODEP ont été développés principalement afin d'évaluer les risques d'exportation de phosphore en milieu agricole. Aussi, les routines de calcul de prédictions des taux de ruissellement, d'érosion et d'exportation de phosphore font intervenir plusieurs informations pertinentes à l'aménagement hydro-agricole des champs et leur régie. La documentation des pratiques de gestion courantes du parcellaire vise à produire une évaluation la plus réaliste possible des exportations annuelles moyennes de sédiments et de phosphore à l'échelle du territoire à l'étude. Il est aussi possible de générer dans GéODEP des scénarios alternatifs d'aménagement et de régie du parcellaire et d'en projeter les retombées environnementales, en comparant ces résultats avec ceux obtenus au préalable dans le scénario de référence.

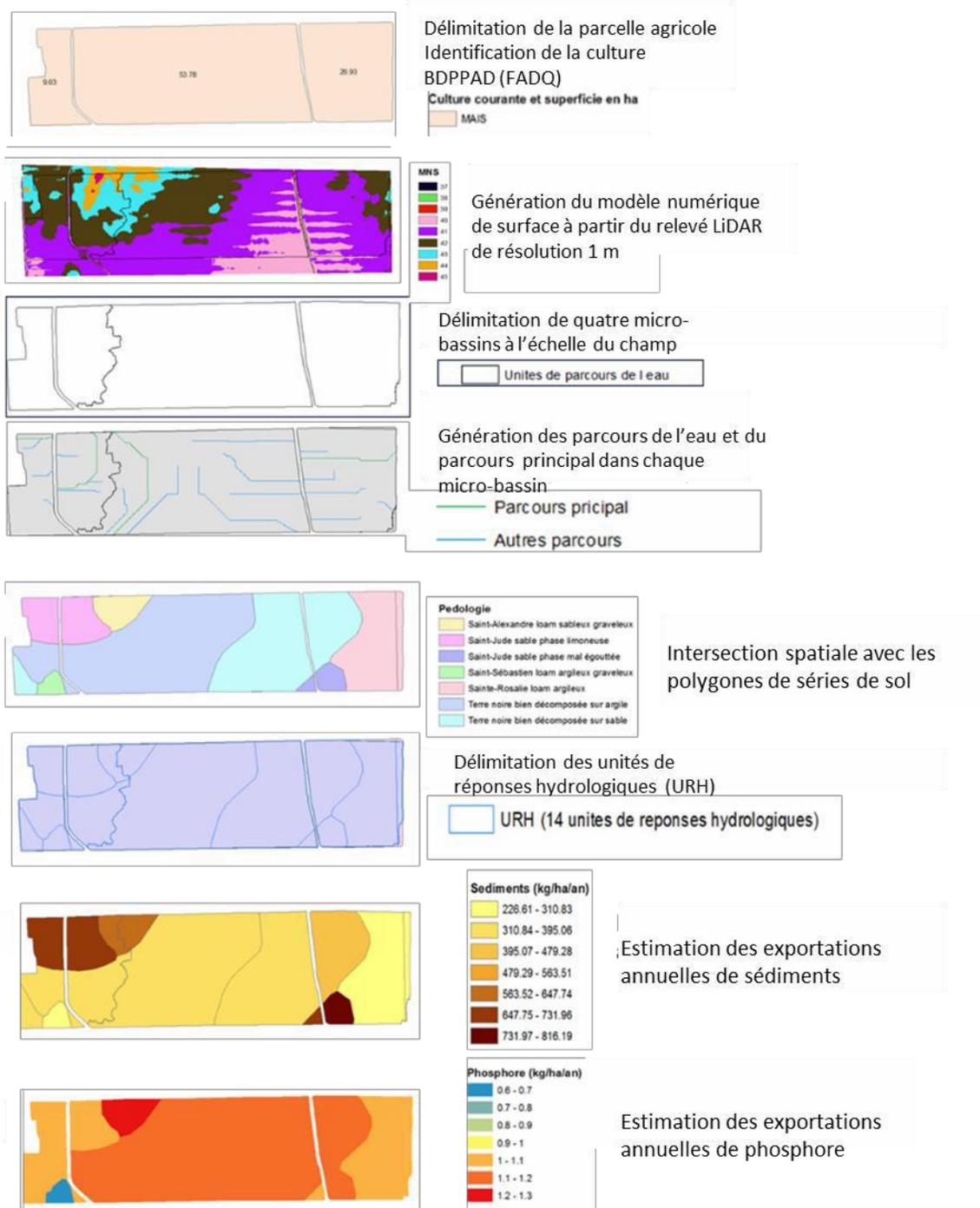


Figure 21. Illustration des différentes étapes de traitement des données à référence spatiale dans GéODEP pour une portion de territoire à vocation agricole.

Pour les fins de la présente étude, trois scénarios de gestion agricole ont été générés en intrants aux simulations dans GÉODEP.

Le scénario particulier de gestion agricole a été généré sur la base des données de régie des champs colligées par l'équipe de l'OBV Yamaska et du club conseil Gestrie-Sol auprès des entreprises agricoles du bassin versant du lac Boivin (Labrie et al., 2018). Pour la portion non documentée par l'équipe de services-conseils, les données à référence spatiale de la BDPPAD (La Financière, 2017) et la carte écoforestière du MFFP (2010) ont permis d'établir la distribution spatiale des cultures, auxquelles ont été associés des scénarios de régie représentatifs des types de sols des vocations des entreprises agricoles du territoire à l'étude.

Le scénario alternatif de gestion agricole est une modulation du *scénario particulier* appliqué au bassin versant du lac Boivin. Concrètement, de nouvelles pratiques culturales, des aménagements des terres et des régies de fertilisation ont été substitués aux données originales des entreprises agricoles à l'échelle du champ. Rappelons que ces modulations de la régie avaient pour seul objectif de tester la sensibilité du modèle à des régies alternatives des sols et des cultures. Le choix des régies n'a fait aucunement l'objet de discussions auprès des principaux concernés, les producteurs agricoles. Ces résultats doivent donc être considérés qu'à titre indicatif. L'application GÉODEP et ses différents modules livrés dans le cadre du présent projet permettent cependant d'explorer, champ par champ, les effets de différents scénarios de gestion envisagés par l'entreprise agricole et son conseiller.

Le scénario de référence a été appliqué à l'ensemble du territoire de la MRC de La Haute-Yamaska non compris dans le bassin du lac Boivin. Celui-ci reproduit les pratiques de régie des sols et des cultures pour les différentes classes de cultures documentées dans le scénario particulier de gestion appliqué au lac Boivin.

4.2.2 Projections des flux de sédiments et de phosphore des sous-bassins versants du lac Boivin pour le scénario particulier

La projection des risques d'exportation de sédiments et de phosphore des champs en cultures du bassin versant du lac Boivin résulte d'un effort concerté, et d'envergure sans précédent, de partage de données de régie des champs de la part des producteurs agricoles de la zone d'étude. Les sections suivantes présentent dans un premier temps ce portrait d'ensemble de la régie des sols et des cultures du bassin versant, tel que colligé par l'équipe de projet. En deuxième partie, les projections de flux de sédiments et de phosphore résultant de l'application de GÉODEP à ce scénario particulier de gestion sont présentées à l'échelle des sous-bassins versants du lac Boivin.

Description du scénario particulier de gestion agricole

Dans un contexte d'accompagnement agroenvironnemental, ferme par ferme, il est important d'alimenter les outils de modélisation de données précises. Par exemple, alors que le scénario de référence de GÉODEP utilise les données pédologiques régionales, le scénario particulier gagne à intégrer les analyses de sol propres au champ, lesquelles révèlent souvent une hétérogénéité de compositions, là où les données régionales attribuent une valeur unique. Afin de dresser ce portrait précis de gestion des champs, il était essentiel de rencontrer directement les producteurs agricoles concernés par le projet. Un duo formé d'une employée de l'OBV Yamaska et d'une employée du club conseil Gestrie-Sol a convié les entreprises agricoles du bassin versant du lac Boivin à trois rencontres de groupe, où les objectifs, l'avancement et les avantages du projet étaient présentés en détails. Des publications dans les journaux locaux et le tournage d'un documentaire à l'émission *La semaine verte* ont permis d'étendre la diffusion du projet plus largement.

De manière à éviter des sollicitations à plusieurs reprises, les rencontres combinaient une mise à jour des plans agroenvironnementaux de fertilisation (PAEF) pour les clients du club conseil Gestrie-Sol, en plus d'un questionnaire permettant d'acquérir les informations utilisées en intrants au modèle GÉODEP. Puisque plusieurs de ces informations pouvaient être extraites directement des PAEF à jour, un travail d'épuration a été effectué pour garder les rencontres aussi concises que possible. Les informations colligées à l'échelle du champ auprès des producteurs, et utilisées ultérieurement en intrants dans GÉODEP, sont les suivantes :

- Culture, saison courante
- Culture, saison antécédente
- Culture de couverture suivant la récolte
- Culture de couverture durant la saison de production
- Taux application de phosphore, engrais minéraux en rang
- Taux application de phosphore, engrais minéraux à la volée
- Type de fumier utilisé majoritairement
- Dose 1 en phosphore d'épandage d'engrais de ferme
- Période 1er épandage
- Délai d'incorporation de la dose 1
- Dose 2 en phosphore d'épandage d'engrais de ferme
- Période 2e épandage
- Délai d'incorporation de la dose 2
- Dose 3 en phosphore d'épandage d'engrais de ferme
- Période 3e épandage
- Délai d'incorporation de la dose 3
- Travail du sol
- Matière organique
- Teneur du sol en phosphore, Mehlich-3
- Saturation du sol en aluminium, Mehlich-3
- Aménagement du drainage souterrain
- Classe d'écoulement de surface
- Condition du profil cultural
- Bandes riveraines
- Aménagements de structure de contrôle

Certaines données descriptives des propriétés des sols et du relief ont été générées par les modules de calculs de GÉODEP sur la base de sa banque de données hydro-pédologiques. Ces données rapportées à l'échelle des unités de calcul du modèle GÉODEP, soit les unités de réponses hydrologiques (URH), incluent les informations suivantes :

- Identification de la série de sols
- Classe texturale et qualificatif du sol de surface
- Proportion (%) de sable du sol de surface
- Proportion (%) d'argile du sol de surface
- Proportion (%) de sable très fin du sol de surface
- Classes de perméabilité
- Groupe hydrologique
- Teneur naturelle en phosphore total
- Longueur maximale du parcours de l'eau
- Pente moyenne du parcours de l'eau

Les rencontres avec les producteurs se sont tenues majoritairement entre les mois de janvier et août 2018, en tenant compte d'une période d'indisponibilité des producteurs agricoles entre les mois d'avril et juin. Au total, 34 producteurs ont été rencontrés directement, alors que 36 PAEF et 51 plans d'accompagnement agroenvironnementaux (PAA) ont été acquis. Ces informations, d'abord inscrites dans un tableur numérique ou en format papier, ont par la suite été extraites et transposées dans un système d'information géographique afin de permettre certains traitements spatiaux, et pour les conformer à la structure requise par GÉODEP.

L'acquisition des plans de ferme de ces mêmes producteurs a permis de redécouper les polygones préalablement déterminés par combinaison des données de la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD) et du système d'information écoforestière (SIEF). Pour diverses raisons, la BDPPAD ne reflète pas toujours la vocation des champs. Par exemple, certaines superficies en culture ne sont pas assurées. Il est aussi fréquent que certaines zones non productives ne soient pas cultivées, ou qu'un champ soit subdivisé en diverses cultures. La discussion avec le producteur permet par ailleurs d'obtenir des détails intéressants quant aux pratiques et aux problématiques rencontrées, informations qui s'avèrent très utiles à la recherche et l'évaluation de scénarios alternatifs de gestion. À terme, l'intégration de ces données fines dans GÉODEP permettra de présenter aux entreprises agricoles des projections de pertes de sol et de phosphore sous la forme de rapports individuels. Ces derniers faciliteront l'accompagnement ciblé des producteurs dans la recherche de scénarios de gestion sur mesure, qui rencontrent les besoins de l'entreprise de même que les objectifs du projet de mise en valeur du lac Boivin et de son bassin versant.

Les tableaux 8 à 12 présentent un portrait d'ensemble de l'aménagement des terres et des régies des sols et des cultures pour l'ensemble des 4 056 ha en culture du bassin versant du lac Boivin caractérisés à l'échelle du champ. Des informations complémentaires sur les systèmes de cultures et d'élevage de la région d'étude sont rapportées dans le document *Caractérisation et portrait du bassin versant du lac Boivin* produit par l'OBV Yamaska (2018) dans le cadre du programme Prime-Vert Volet 2.1 ciblé sur l'action concertée en bassin versant.

Dans l'ensemble, plus de 78 % de la superficie en cultures est occupée par les prairies (tableau 8). Les principales cultures annuelles, soit le maïs et le soya, occupent respectivement 10,7 % et 6,7 % de la superficie totale en culture. La majeure partie des champs du bassin versant (88 %) ne profitent pas de drainage souterrain. Les plus importantes superficies de champs drainés sont associées aux cultures annuelles de maïs et de soya (tableau 8).

Tableau 8. Distribution des cultures et des aménagements du drainage souterrain des champs inventoriés du bassin versant du lac Boivin.

Classes de cultures	Superficie		Drainage systématique	Drainage partiel	Absence
	ha	%	ha	ha	ha
Céréales à paille	102,5	2,5	33,8		68,7
Canola	7,4	0,2			7,4
Prairie	3 170,4	78,2	270,1	45,6	2 854,7
Maïs	434,6	10,7	53,1	11,6	369,9
Cultures mixtes	32,4	0,8			32,4
Petits fruits	30,3	0,7			30,3
Soya	273,5	6,7	24,6	46,5	202,5
Autres cultures	5,3	0,1			5,3
Total	4 056,4	100	381,5	103,6	3 571,3
<i>% du total</i>			9,4	2,6	88,0

En ce qui a trait aux pratiques de travail du sol, la très grande majorité des superficies en cultures annuelles du bassin versant (83 %) sont déclarées en semis direct (tableau 9). Le caractère pierreux et graveleux de la majeure partie des sols du bassin versant, de même que la qualité de leur drainage interne, ont encouragé l'adoption de pratiques culturales sans labour. Seulement 67 ha en culture ont ainsi été labourés à l'automne 2017 sur l'ensemble des 856 ha en cultures annuelles répertoriées. Le recours aux cultures de couverture est pour sa part absent du paysage du bassin versant.

Tableau 9. Distribution des pratiques de travail du sol pour les cultures annuelles des champs inventoriés du bassin versant du lac Boivin.

Classes de cultures annuelles	Superficie ha	Labour d'automne	Déchaumage automne	Déchaumage printemps	Semis direct
		ha	ha	ha	ha
Céréales à paille	102,5	2,3		2,2	98,1
Canola	7,4				7,4
Maïs	434,6	37,3	17,4	47,6	332,3
Cultures mixtes	32,4		5,5		27,0
Soya	273,5	27,3	3,9		242,3
Autres cultures	5,3				5,3
Total	855,7	66,8	26,8	49,8	712,3
<i>% du total</i>		<i>7,8</i>	<i>3,1</i>	<i>5,8</i>	<i>83,2</i>

Tableau 10. Distribution des richesses et saturations des sols en phosphore des champs inventoriés du bassin versant du lac Boivin.

Classes de cultures	Superficie ha	PM-3 (kg P/ha)		Saturation (P/Al)	
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Céréales à paille	102,5	174	87	6,3	3,4
Canola	7,4	129	35	5,2	2,3
Prairie	3 170,40	184	97	6,8	4,0
Maïs	434,6	196	134	7,4	5,2
Cultures mixtes	32,4	172	17	6,1	0,9
Petits fruits	30,3	216	30	8,6	1,6
Soya	273,5	230	146	8,7	5,1
Autres cultures	5,3	187	25	6,4	1,5
Total	4 056,40	188	105	7,0	4,2

Les sols en culture du bassin versant ont une teneur moyenne en P Mehlich-3 de l'ordre de 188 kg P/ha (écart-type de 105), ce qui se traduit en une saturation moyenne en P de 7,0 % (écart-type de 4,2). Le tableau 10 présente le portrait des richesses de sol en P par culture. Ces taux de richesses en phosphore traduisent des apports en P relativement modestes à l'échelle du bassin versant. Tel qu'il est présenté aux tableaux 11 et 12, l'apport spécifique moyen en P estimé pour les superficies en culture inventoriées du bassin versant du lac Boivin est de l'ordre de 20 kg P₂O₅/ha. Globalement, cet apport est imputable à 86 % aux engrais de ferme, alors que les engrais minéraux phosphatés contribuent à 14 % de l'apport de P sur les terres. Suivant les informations colligées par l'OBV Yamaska, ce sont les bovins laitiers (38,5 %) qui représentent le plus grand nombre d'unités animales du bassin versant, suivi par le porc (33,2 %), les veaux lourds (12,2 %), les bovins de boucherie (11,1 %), les volailles (4,4 %) et les chevaux (0,6 %). Dans l'ensemble, la densité animale est de l'ordre de 0,37 unité animale à l'hectare dans le bassin versant du lac Boivin, sur la base des données déclarées au MAPAQ (OBV Yamaska, 2018).

Les superficies en prairie reçoivent la plus large part des épandages des engrais de ferme. Environ 1 160 ha reçoivent un taux moyen d'apport de P de l'ordre 46 kg P₂O₅/ha, suivant un à trois épandages, pour l'essentiel non incorporés. De cette superficie en prairie dédiée aux épandages d'engrais de ferme, environ la moitié recevront un deuxième épandage et environ 20 % un troisième, suivant des taux moyens respectifs de 28 et 19 kg (tableau 11). Un peu plus de la moitié des superficies en maïs, soit 256 ha, reçoivent pour leur part des engrais de ferme à un taux moyen de l'ordre 47 kg P₂O₅/ha. Enfin, environ le quart des superficies en production de soya reçoivent des engrais de ferme, à un taux moyen de 31 kg P₂O₅/ha.

Tableau 11. Distribution des apports de phosphore provenant d'engrais de ferme et d'engrais minéraux par classe de culture des champs inventoriés du bassin versant du lac Boivin.

Classes de cultures	Sup ha	Engrais de ferme							Engrais minéraux			
		1 ^{er} épandage		2 ^e épandage		3 ^e épandage		Taux global kg P ₂ O ₅ /ha	en bande		à la volée	
		Sup ha	Taux kg P ₂ O ₅ /ha	Sup ha	Taux kg P ₂ O ₅ /ha	Sup ha	Taux kg P ₂ O ₅ /ha		Sup ha	Taux kg P ₂ O ₅ /ha	Sup ha	Taux kg P ₂ O ₅ /ha
Céréales à paille	103	8	17	0	0	0	0	17	12	33	18	26
Canola	7	2	34	1	24	0	0	48	0		0	
Prairie	3 170	1 159	28	654	27	209	19	46	2	34	76	32
Maïs	435	256	47	13	37	0	0	49	47	21	4	36
Cultures mixtes	32	0							5	95	0	
Petits fruits	30	0							0		0	
Soya	274	61	39	3	52	0	0	42	44	57	11	37
Autres cultures	5	0							0		0	
Total	4 056	1 485	31	672	28	209	19	47	111	40	109	65

Tableau 12. Bilan des apports en phosphore classe de culture des champs inventoriés du bassin versant du lac Boivin.

Classes de cultures	Superficie ha	Apport total eng. ferme kg P ₂ O ₅	Apport total eng. min. kg P ₂ O ₅	Apports totaux kg P ₂ O ₅	Bilan spécifique global kg P ₂ O ₅
Céréales à paille	103	130	877	1 007	10
Canola	7	107	0	107	14
Prairie	3 170	53 876	2 529	56 405	18
Maïs	435	12 627	1 148	13 775	32
Cultures mixtes	32	0	520	520	16
Petits fruits	30	0	0	0	0
Soya	274	2 553	2 883	5 436	20
Autres cultures	5	0	0	0	0
Total	4 056	69 292	11 546	80 839	20

Projections des exportations de sédiments et de phosphore à l'échelle du bassin versant du lac Boivin

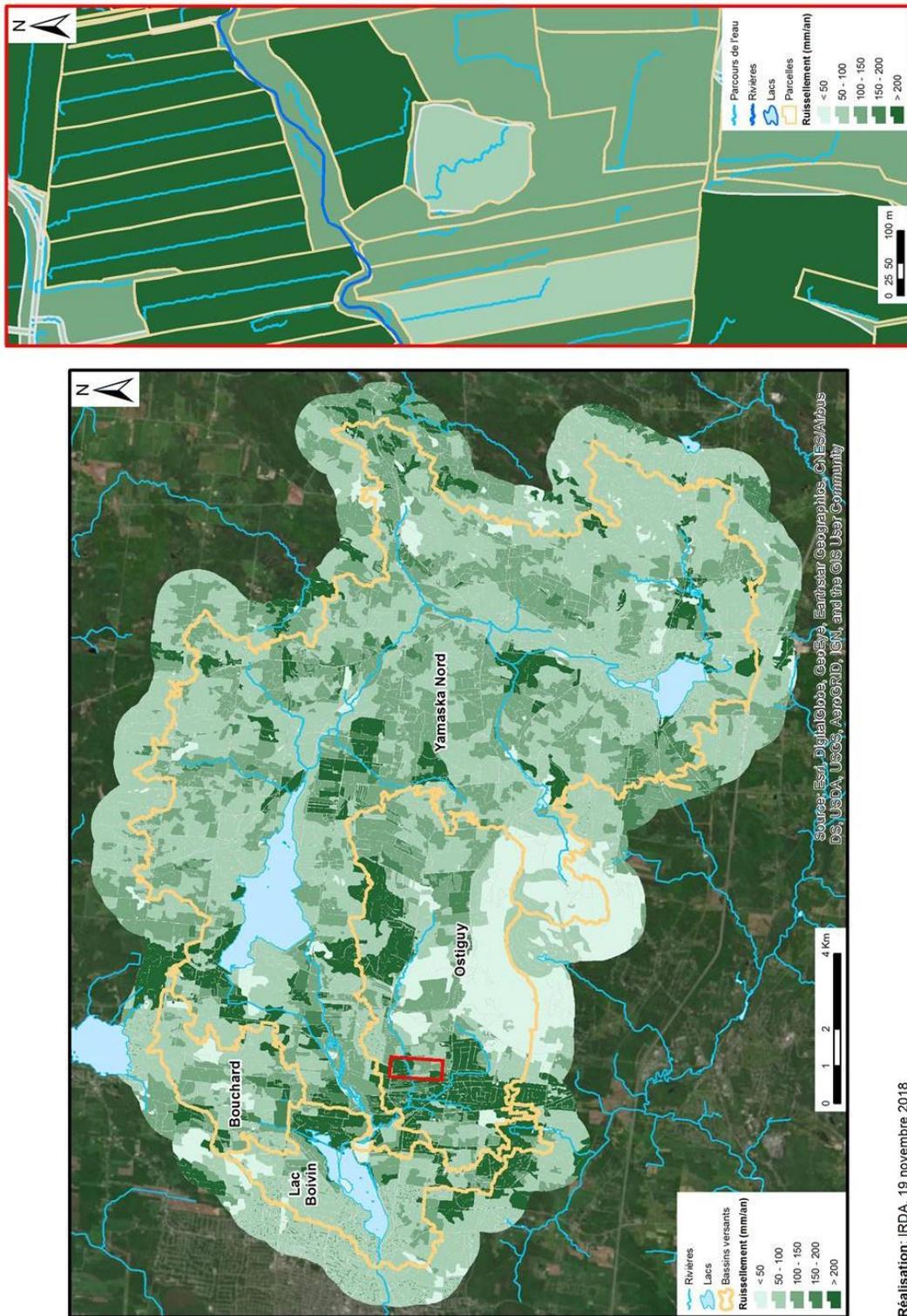
Globalement, à l'échelle du sous-bassin versant du lac Boivin, les projections de GÉODEP ont été estimées pour plus de 34 700 unités de réponse hydrologique (URH). Les taux d'exportation de sédiments ont été estimés pour l'ensemble des occupations agricole (25 % de la superficie du bassin), de même que la portion non agricole du bassin, incluant le milieu forestier (58 % de la superficie du bassin versant) et les autres occupations, telles que décrites au tableau 3 précédemment. Les projections de flux de sédiments par GÉODEP à l'échelle des URH font intervenir la hauteur projetée du ruissellement de surface (figure 23), l'érodabilité du sol, l'analyse des parcours de l'eau (longueurs et inclinaison, facteur LS) et un facteur de couverture (C) propre à l'occupation du sol et à la régie des champs. Les facteurs « C » retenus pour les occupations non agricoles du territoire, principalement associés aux routes, au milieu forestier et aux secteurs urbanisés, sont extraits d'exercices de modélisation antérieurs réalisés au Québec et au Vermont (Deslandes et al., 2006; Michaud et al., 2007; Winchell et al., 2011). Les projections d'exportation de sédiments des champs en culture ont été estimées sur la base des indices « C » de GÉODEP pour différentes combinaisons de cultures et de régies des sols (Michaud et al., 2008).

Les taux d'exportation de phosphore pour le parcellaire agricole (5 293 ha) ont été estimés par les algorithmes de calcul de GÉODEP. Pour les occupations non agricoles du territoire, les coefficients spécifiques d'exportation annuelle (exprimés en kg P/ha- an) estimés par Winchell et al. (2011) ont été retenus. Ceux-ci découlent d'une modélisation hydrologique à haute résolution calibrée pour les portions américaines des bassins des rivières transfrontalières (Québec/Vermont) aux Brochets, Missisquoi et La Roche, à laquelle l'équipe de l'IRDA a contribué. Les coefficients spécifiques d'exportation annuelle retenus expriment la contribution annuelle moyenne en phosphore total des secteurs urbanisés (0,72 kg P/ha), des routes pavées (1,17 kg P/ha) et non pavées (0,78 kg P/ha), de la forêt (0,14 kg P/ha), des milieux humides (0,72 kg P/ha), des friches (0,14 kg P/ha).

Les figures 22 à 24 illustrent successivement les projections des hauteurs de ruissellement et des exportations spécifiques (sur la base de la superficie) de sédiments et de phosphore total par le modèle GÉODEP pour l'ensemble du bassin versant du lac Boivin sur la base du scénario particulier de régie des sols et des cultures décrit précédemment. Le tableau 13 présente pour sa part les charges cumulées de sédiments (MES) et de phosphore total estimées pour chacune des classes d'occupation du territoire à l'échelle du bassin versant du lac Boivin et ses sous-bassins Yamaska Nord, Ostiguy et Bouchard.

Ruissellement du bassin versant du lac Boivin

Scénario particulier 2018



Réalisation: IRDA, 19 novembre 2018

Figure 22. Projections de la hauteur de ruissellement de surface du bassin versant du lac Boivin.

Exportation de sédiments du bassin versant du lac Boivin

Scénario particulier 2018

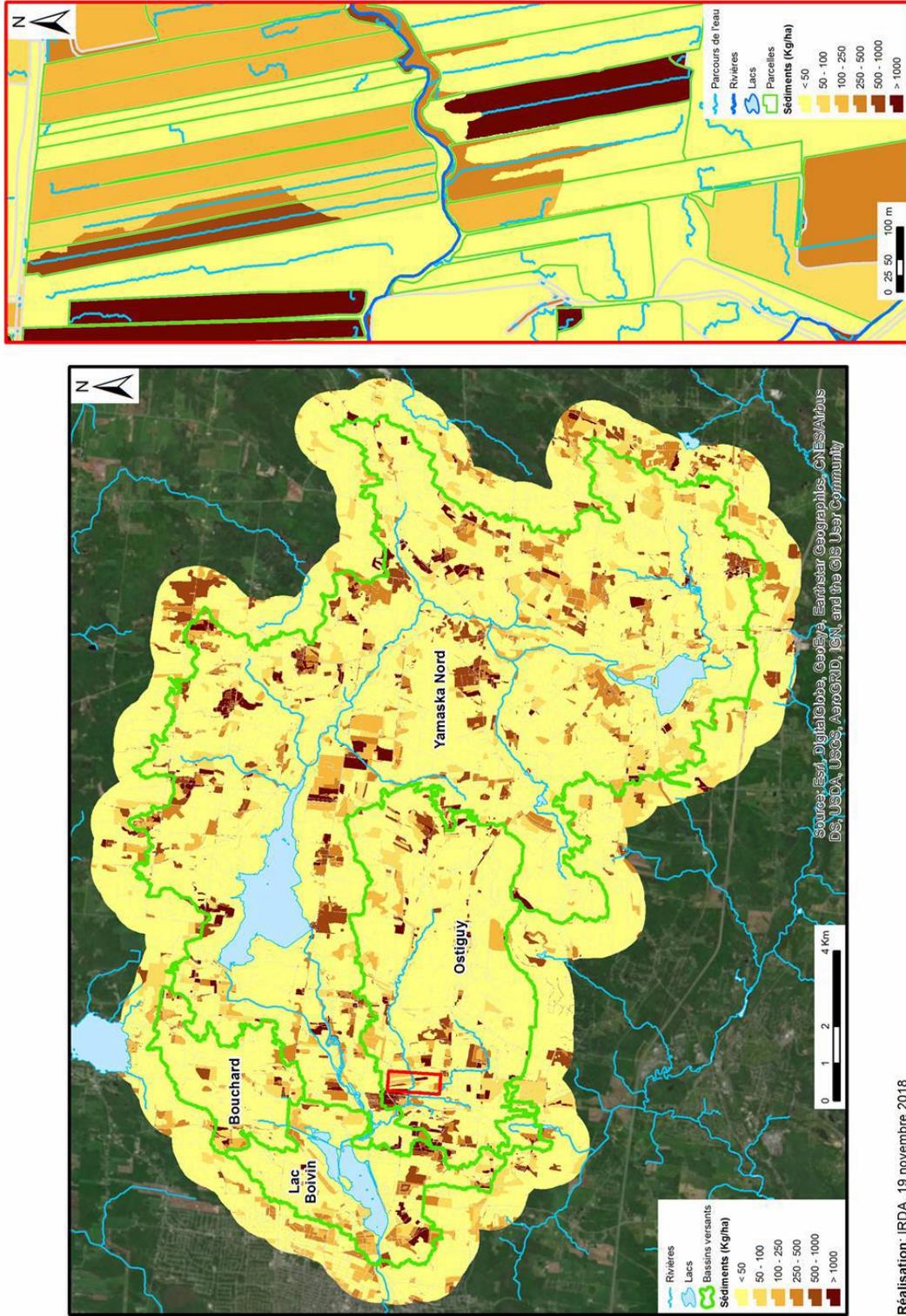


Figure 23. Projections des exportations annuelles de sédiments du bassin versant du lac Boivin.

Exportation de phosphore du bassin versant du lac Boivin

Scénario particulier 2018

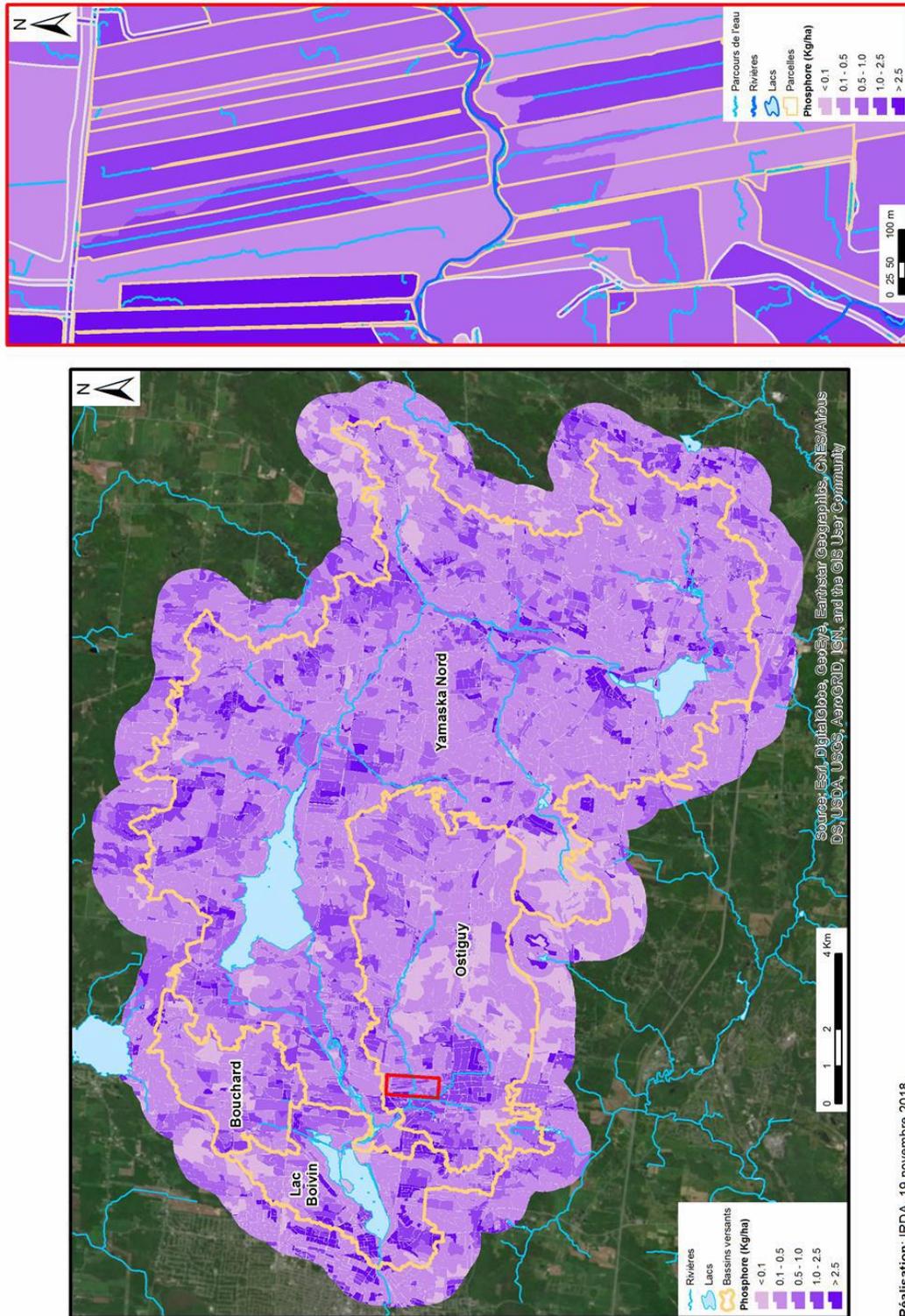


Figure 24. Projections des exportations annuelles de phosphore total du bassin versant du lac Boivin.

Tableau 13. Projections des charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol pour le bassin versant du lac Boivin et ses sous-bassins Yamaska Nord, Ostiguy et Bouchard.

	Bassin du Lac Boivin					Sous-bassin Yamaska Nord				
	Sup.	Charge MES	Charge spécifique MES	Charge P total	Charge spécifique P total	Sup.	Charge MES	Charge spécifique MES	Charge P total	Charge spécifique P total
	ha	kg/an	kg/ha-an	kg/an	kg/ha-an	ha	kg/an	kg/ha-an	kg/an	kg/ha-an
Céréales à paille	155	179 641	1 163	232	1,50	143	149 409	1 047	192	1,35
Prairie	4 392	1 233 530	281	3 230	0,74	3 811	1 173 563	308	2 940	0,77
Maïs	443	566 607	1 279	790	1,78	380	545 711	1 434	719	1,89
Soya	274	549 738	2 008	724	2,64	265	547 607	2 063	713	2,69
Petits fruits	29	67 540	2 304	84	2,88	10	24 206	2 315	38	3,67
Total agricole	5 293	2 597 056	491	5 062	0,96	4 610	2 440 497	529	4 603	1,00
Forêt	11 444	368 728	32	1 602	0,14	10 432	356 360	34	1 495	0,14
Friches	807	42 747	53	145	0,18	681	40 789	60	123	0,18
Résidentiel	1 766	90 076	51	1 272	0,72	1 376	82 478	60	990	0,72
Routes non pavées	484	200 544	414	378	0,78	425	192 601	453	331	0,78
Routes pavées	218	31 990	147	255	1,17	163	24 164	148	190	1,17
Milieux humides	139	1 351	10	100	0,72	88	1 203	14	64	0,72
Eaux	957	0	0	1	0,0006	752	0	0	0	0,00
Total bassin	21 109	3 332 492	158	8 814	0,42	18 527	3 138 094	169	7 797	0,42
	Sous-bassin Bouchard					Sous-bassin Ostiguy				
	Sup.	Charge MES	Charge spécifique	Charge P total	Charge spécifique P total	Sup.	Charge MES	Charge spécifique	Charge P total	Charge spécifique P total
	ha	kg/an	kg/ha-an	kg/an	kg/ha-an	ha	kg/an	kg/ha-an	kg/an	kg/ha-an
Céréales à paille	6	2 502	391	9	1,37	29	36 235	1 267	52	1,81
Prairie	298	85 309	286	345	1,16	787	198 262	252	551	0,70
Maïs	37	10 405	279	50	1,35	69	29 037	423	81	1,18
Soya	8	2 131	253	11	1,26	67	168 506	2 525	241	3,62
Petits fruits	13	19 718	1 503	15	1,15	0	0	0	0	0,00
Total agricole	364	120 065	330	430	1,18	951	432 040	454	925	0,97
Forêt	526	11 036	21	74	0,14	1 978	92 475	47	277	0,14
Friches	31	958	31	6	0,18	61	2 143	35	11	0,18
Résidentiel	24	1 520	64	17	0,72	480	37 548	78	346	0,72
Routes non pavées	17	3 510	212	13	0,78	124	107 012	860	97	0,78
Routes pavées	6	616	100	7	1,17	40	4 961	124	47	1,17
Milieux humides	5	36	7	3	0,72	0	0	0	0	0
Eaux	2	0	0	0	0	18	0	0	0	0
Total bassin	974	137 742	141	550	0,56	3 652	676 179	185	1 703	0,47

Les figures 25 et 26 illustrent pour leur part la distribution des taux d'exportation de sédiments et de P projetés pour les portions agricoles du sous-bassin versant du lac Boivin, tels qu'illustrés aux figures 22 à 24. Ces taux projetés sont mis en relation avec quelques variables déterminantes des exportations de sédiments et de P utilisées en intrants par le méta-modèle GÉODEP. Cette représentation des variables de sorties et d'entrées du méta-modèle illustre le pouvoir explicatif des principaux facteurs déterminants retenus par GÉODEP. Conceptuellement, ces facteurs expriment les deux principaux vecteurs d'exportation du P, soit les facteurs *Sources* et les facteurs *Transport*. Les *Sources* de P utilisées en intrants par le modèle sont le stock de P contenu dans les sols (exprimé par la richesse et la saturation du sol en P), de même que les apports annuels en engrais de ferme

(fumiers et lisiers) et en engrais minéraux. Les facteurs déterminants du *Transport*, associés au ruissellement de surface à l'érosion, sont pour leur part déterminés par les propriétés des sols (infiltration et érodabilité), le relief (longueur et inclinaison des parcours de l'eau) et la couverture de la surface du sol (par les résidus ou par les plantes).

La figure 25a illustre la distribution des taux d'exportation de sédiments en fonction des taux projetés de ruissellement de surface par GÉODEP. Dans l'ensemble, les taux de ruissellement projetés varient de 65 à 350 mm par an. Cette forte disparité traduit en premier lieu la classification des groupes hydrologiques des sols du bassin versant prise en compte dans le modèle et exprimée suivant la méthode de Gagné et al. (2013). La présence de drainage souterrain systématique ou partiel ainsi que la classe du drainage de surface et de la condition du sol documentée dans GÉODEP (Michaud et al., 2008) contribuent aussi à moduler le taux de ruissellement de surface projeté par GÉODEP. Bien qu'une tendance à l'augmentation du taux d'exportation de sédiments soit suggérée en réponse à l'accroissement du taux de ruissellement, la figure 25a met en relief que l'exportation de sédiments varie considérablement pour un taux de ruissellement donné. Cette dispersion dans les taux projetés d'exportation de sédiments reflète les effets cumulés du relief, des propriétés des sols et de la régie de la parcelle pris en compte dans le modèle. Il s'en suit une forte discrimination des taux projetés de pertes de sédiments, d'une valeur pratiquement nulle, par exemple, sur un terrain plat, très perméable (groupe hydrologique « A »), drainé et en prairie, à plus de 5 tonnes de sédiments par hectare, sur des sols peu perméables, sans drainage souterrain, en culture annuelle sans pratique culturale anti-érosive, et suivant de longs parcours de l'eau et/ou de fortes pentes.

La figure 25b traduit pour sa part l'influence de l'occupation du sol et du relief sur la projection du taux d'exportation de sédiments projeté par GÉODEP. Les taux d'érosion les plus élevés y sont associés aux cultures annuelles (soya, maïs et céréales à paille) cultivées sur un relief en pente, exprimés par des valeurs élevées de facteur topographique LS dans le modèle GÉODEP. La culture du soya est associée au taux d'exportation de sédiments le plus élevé, soit environ deux tonnes de sédiments par an en moyenne à l'échelle du bassin versant (tableau 13). La faible protection anti-érosive offerte par des résidus de culture peu abondants explique cette vulnérabilité aux processus érosifs. Celle-ci est cependant fortement modulée par les propriétés des sols et du relief, de même que par l'aménagement des terres. Le paysage du bassin versant du lac Boivin offre en effet une large gamme de pentes et de longueurs de parcours de l'eau, qui contribue à l'importante variabilité de pertes de sol pour un type de sol et de culture donnés. En production de foin, cette variabilité dans les projections de pertes de sol est aussi tributaire de l'année de rotation, reflétant ou non, un labour de la prairie à l'automne.

En ce qui a trait au phosphore, les résultats du suivi hydrométrique des sous-bassins du lac Boivin présentés antérieurement ont démontré que la plus large part de la charge de phosphore observée dans les cours d'eau est de nature particulaire. Cette corrélation entre le taux de pertes de sédiments et de phosphore est clairement exprimée par les projections de GÉODEP à l'échelle du bassin du lac Boivin, tel qu'illustré en figure 26. En clair, la portion la plus vulnérable du parcellaire à l'érosion est aussi associée à l'exportation spécifique la plus élevée de phosphore. Il n'est donc pas surprenant de constater que les superficies en culture de soya sont associées au taux moyen le plus élevé de pertes de phosphore (2,64 kg P/ha; Tableau 13), reflétant la vulnérabilité de cette culture au processus d'érosion évoqué précédemment.

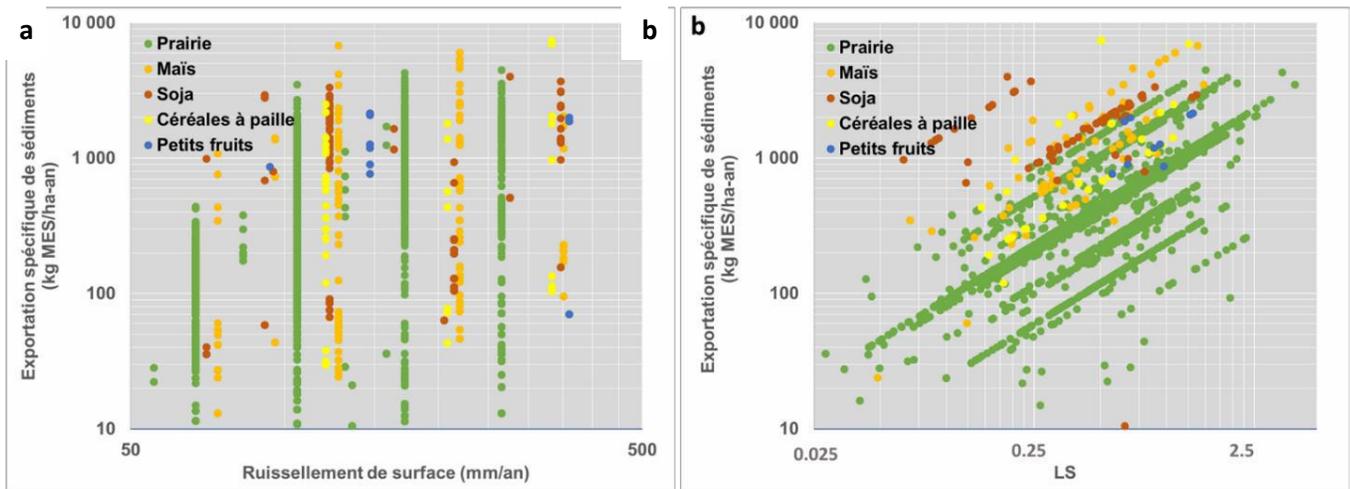


Figure 25. Projections des taux spécifiques d'exportation de sédiments des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole du sous-bassin versant du lac Boivin (N=6,066) en fonction de la hauteur du ruissellement de surface (a) et du facteur topographique LS (b).

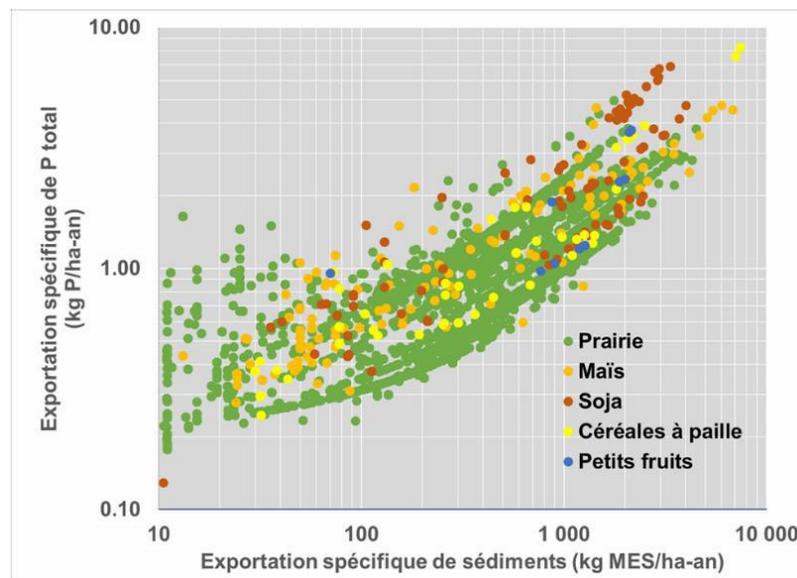


Figure 26. Projections des taux spécifiques d'exportation de phosphore des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole du sous-bassin versant du lac Boivin (N=6,066) en fonction du taux d'exportation de sédiments.

Bien que la figure 26 illustre la corrélation entre les taux projetés de pertes de sol et de phosphore, elle met aussi en relief une variabilité importante de la perte projetée de P pour une classe de culture donnée et présentant un taux d'érosion similaire. Conceptuellement, cette variabilité de l'exportation de P, à taux constant de pertes de sol, illustre l'influence des facteurs Sources pris en compte dans le modèle GéODEP. A ce titre, les figures 27a et 27b rapportent respectivement les taux projetés de pertes de P en fonction des deux principaux facteurs Sources considérés par le modèle GéODEP, soit le stock de P présent dans les sols, exprimés ici par l'indice de saturation en P du sol, de même que le taux d'apport de P dans l'année courante. Dans l'ensemble, une forte dispersion des pertes de P en fonction de la saturation des sols ou du taux d'apport est projetée par le modèle GéODEP (figure 23). *A priori*, cette dispersion rappelle l'influence prédominante des facteurs *Transport* dans l'explication des

taux prédits par GéODEP de pertes de P. Ce constat ne nie cependant pas l'effet de la richesse du sol en P. La disparité des taux projetés de P pour le soya, par exemple (figure 23a), illustre par exemple qu'une saturation en P élevée du sol ajoute à la vulnérabilité aux pertes de P déjà élevée en raison de la susceptibilité à l'érosion.

En ce qui a trait à l'influence des apports de P, rappelons que les algorithmes du modèle attribuent un effet aux apports d'engrais que dans le seul cas où ceux-ci ne sont pas incorporés au sol. Cette hypothèse reflète le consensus dans la littérature scientifique que l'incorporation des engrais annule à toute fin pratique le risque (événementiel) d'enrichissement du ruissellement de surface, un processus actif sur les quelques premiers millimètres de la surface du sol. Dans le cas du territoire à l'étude, seules les superficies en prairie, non retournées dans l'année ou en semis direct de cultures annuelles, ont vu leur richesse en P du ruissellement de surface ajustée en réponse à l'épandage d'engrais de ferme, suivant les algorithmes du modèle. Les bases conceptuelles du module de GéODEP, pertinentes à l'enrichissement événementiel du ruissellement suivant des épandages non incorporés d'engrais de ferme, sont présentées en annexe II. En ce qui a trait aux engrais minéraux phosphatés, considérant que la très large part est appliquée au semis et profite ainsi d'une incorporation, GéODEP n'y attribue aucun effet sur l'enrichissement du ruissellement en P.

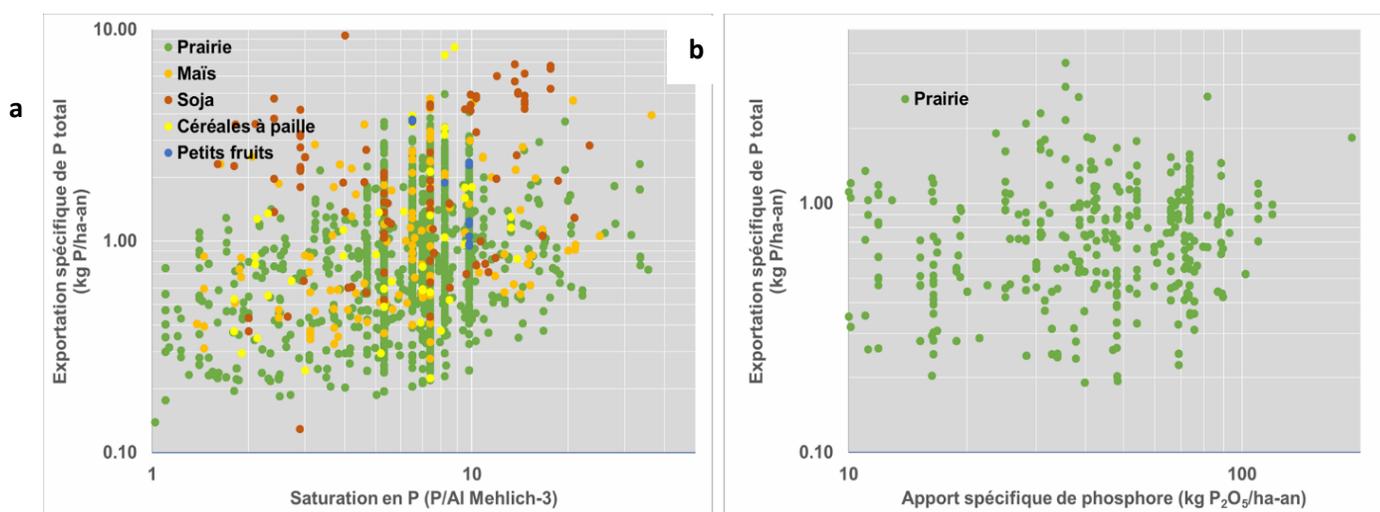


Figure 27. Projections des taux spécifiques d'exportation de phosphore des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole du sous-bassin versant du lac Boivin en fonction de la saturation du sol en phosphore (a) et de l'apport spécifique de phosphore en prairie (b).

La figure 27b illustre les taux prédits d'exportation de phosphore en fonction des taux d'apport de P des engrais de ferme non incorporés sur les parcelles en prairie. Celles-ci reçoivent l'essentiel des épandages non incorporés d'engrais de ferme à l'échelle du bassin versant. Une forte dispersion entre les taux d'apports et d'exportation est observée. Celle-ci reflète le fait que l'enrichissement du ruissellement projeté par le modèle, en lien avec l'épandage d'engrais de ferme non incorporé, est aussi dépendant de l'enrichissement initial du sol en P. Rappelons que cette fonction d'enrichissement du ruissellement en P a été développée sur la base d'observations générées en conditions contrôlées sous pluie simulée sur des champs en Montérégie (N=36). Le dispositif a permis de comparer l'effet de l'application engrais de ferme sur des prairies ou des sols nus par rapport à une parcelle Témoin sans apport d'engrais. L'enrichissement du ruissellement en phosphore réactif soluble lié à l'apport d'engrais de ferme s'est avéré déterminé par la richesse du sol en P, alors que l'état de surface (sol à nu vs prairie) ou les autres propriétés du sol ne contribuaient que marginalement à expliquer l'effet de l'apport de l'engrais de ferme. Pour plus d'information sur les algorithmes retenus dans GéODEP dans l'expression de l'effet des apports non incorporés d'engrais de ferme, le lecteur est invité à consulter l'annexe II du présent rapport de même que

les résultats originaux de l'expérience publiés par Michaud et Laverdière (2004).

Au global, la forte dispersion des taux prédits de pertes de sol et de P par GÉODEP en fonction de chacune des principales variables d'entrées, prises individuellement, reflète que les processus érosifs et de mobilisation de P découlant d'effets et d'interactions de plusieurs facteurs. À sa plus simple expression, la vulnérabilité d'une parcelle agricole donnée est révélée par ses sources de phosphore, qu'elles soient stockées (richesse du sol) ou apportées (apports d'engrais de ferme et minéraux) et les facteurs de mobilisation (ruissellement et érosion). Une implication pratique des résultats de la modélisation GÉODEP appliquée au bassin versant du lac Boivin est la nécessaire prise en compte de l'ensemble des sources et facteurs de transport dans l'appréhension de la vulnérabilité du territoire aux exportations de phosphore. Il en sera de même pour les retombées environnementales de scénarios alternatifs de gestion du parcellaire agricole. L'introduction d'une nouvelle pratique culturale ou d'un nouvel aménagement des terres verra son effet sur l'exportation de P, au final, déterminée par les propriétés des sols, du paysage et du système de culture. L'introduction du semis direct, par exemple, exacerbera la perte de phosphore sur des champs où les engrais de ferme ne sont pas incorporés (effet antagoniste). De la même façon, le cumul de plusieurs pratiques agroenvironnementales pourra se traduire en effets synergiques. Une discussion plus détaillée de ces interactions et de leurs implications opérationnelles est proposée par Martel et al. (2006).

Rappelons que la plate-forme GÉODEP permet à l'utilisateur de projeter, pour un champ donné, l'effet cumulatif de plusieurs pratiques alternatives, et ce dans le contexte de régie et de propriétés des sols propres à la parcelle. La section suivante du rapport exploite ces fonctionnalités dans le contexte propre au bassin versant du lac Boivin. Une mise en garde s'impose cependant. Les projections de GÉODEP, compte tenu de la nature empirique du modèle, reflètent les observations colligées au Québec dans le cadre d'études réalisées en dispositifs expérimentaux de parcelle de recherche, de champs et de micro-bassins versants. La documentation des efficacités environnementales des scénarios alternatifs de régie des sols demeure cependant limitée pour les conditions agroclimatiques propres au Québec et constitue une importante priorité de recherche. Il est à souhaiter que les algorithmes de GÉODEP puissent s'enrichir à terme de nouvelles observations ciblées sur l'évaluation environnementale des pratiques agricoles de conservation des sols et de l'eau.

Comparaison des taux projetés par GÉODEP aux flux mesurés d'exportation de sédiments et de phosphore aux stations hydrométriques.

Le tableau 14 compare le cumul des charges annuelles de sédiments et de phosphore estimées par GÉODEP pour les sous-bassins Yamaska Nord, Ostiguy et Bouchard, tels que détaillé précédemment au tableau 13, avec les flux mesurés aux stations hydrométriques rapportés à la section 3.2. Des écarts importants entre le cumul des émissions projetées par le modèle et les flux mesurés aux exutoires des sous-bassins sont constatés. Ces écarts s'expliquent par la nature même du modèle GÉODEP et des propriétés géophysiques propres au territoire à l'étude.

Tableau 14. Comparaison des taux projetés par GéODEP (modélisé) aux flux mesurés d'exportation de sédiments et de phosphore pour les sous-bassins Yamaska Nord, Ostiguy et Bouchard.

	Yamaska			Ostiguy			Bouchard		
	Mesuré	Projeté	Diff.	Mesuré	Projeté	Diff.	Mesuré	Projeté	Diff.
MES (kg/an)	1 231 601	3 138 094	155%	294 200	676 179	130%	114 418	137 742	20%
MES (kg/ha-an)	66	169		81	185		117	141	
Ptot (kg/an)	7 631	8 206	8%	1 854	1 703	-8%	891	550	-38%
Ptot (kg/ha-an)	0,41	0,44		0,51	0,47		0,92	0,56	

En ce qui a trait aux sédiments, rappelons d'abord que GéODEP projette des taux d'exportation en lien avec les processus d'érosion par ruissellement et ne prend pas en compte dans ses calculs les phénomènes qui se produisent dans les fossés et les cours d'eau, notamment, les processus de sédimentation ou d'érosion riveraine. Les relevés hydrométriques des sous-bassins Yamaska Nord et Ostiguy, commentés antérieurement, témoignent de l'influence du processus de sédimentation, en lien avec la présence de réservoirs et de zones de refoulement du débit. Ceux-ci ont pour effet d'atténuer le transport de sédiments depuis les zones d'émission en amont et l'exutoire du bassin à l'aval. Ainsi, il n'est pas surprenant de constater que les flux mesurés dans la Yamaska Nord et au ruisseau Ostiguy soient inférieurs au cumul des flux projetés par GéODEP. Les écarts très importants (130-155%) entre les projections de flux émis par GéODEP et les flux mesurés aux stations de la Yamaska Nord et Ostiguy suggèrent une influence marquée des processus de sédimentation à l'œuvre dans le réservoir Choinière et le secteur aval du ruisseau Ostiguy. L'émission de sédiments projetée pour le bassin Bouchard (138 tonnes/an) est pour sa part 20 % supérieure au flux mesuré à la station hydrométrique (114 tonnes/an). Un meilleur ajustement des flux projetés et mesurés découlerait d'un paysage moins propice à la sédimentation dans le bassin du ruisseau Bouchard que dans les secteurs plus en amont du bassin versant. Rappelons que GéODEP ne modélise pas les processus d'érosion et de sédimentation du P dans le réseau hydrographique.

Les charges de phosphore projetées par GéODEP présentent un meilleur ajustement aux charges observées que les MES. Pour le grand sous-bassin de la Yamaska Nord, les projections de GéODEP surestiment de façon marginale le flux de P, dans l'ordre de 8 %. Au bassin Ostiguy, la charge projetée de phosphore est plutôt sous-estimée, dans l'ordre de 8%. Un écart si important dans les ajustements des projections de flux de sédiments et de phosphore dans ces deux bassins versants surprend a priori. La dynamique de la transformation des stocks de P dans le réseau hydrographique est cependant bien documentée dans la littérature. En bref, les formes particulières de P stockées dans le paysage deviennent avec le temps une source de P de nature plus soluble et réactive. Une revue exhaustive de cette dynamique dans le contexte agroenvironnemental a été produite par Dodd et Sharpley (2016). L'implication pratique de ces études est que la rétention de sédiments dans un bassin versant donné ne se traduit pas en rétention équivalente de P.

Enfin, la sous-estimation du flux de P est plus importante au ruisseau Bouchard, soit dans l'ordre de 38%. Les résultats de l'échantillonnage des branches du ruisseau rapportés antérieurement suggèrent que la sous-estimation des flux de P serait vraisemblablement associée à un paramétrage du modèle qui ne traduirait pas adéquatement les sources de phosphore en présence dans le bassin versant. Un autre facteur d'incertitude qui a pu contribuer à une sous-estimation des flux dans le bassin Bouchard est lié à la présence de sols organiques en culture. À notre connaissance, une seule étude a documenté les flux de P en terres noires au Québec, atteignant près de 6,0 kg P/ha-an sur un micro-bassin versant dédié à la culture maraîchère en sols organiques en Montérégie (Michaud et al., 2012). Tel qu'il a été mentionné précédemment, les modules actuels de GéODEP ne sont cependant pas adaptés à la représentation des processus hydrologiques particuliers aux sols organiques.

Bien qu'une sous-estimation des flux de P du secteur agricole soit admise, rappelons que GéODEP a été conçu de façon à représenter les flux moyens de sédiments et de nutriments sur une base annuelle. Les charges de sédiments

et de phosphore sont cependant appelées à varier considérablement d'une année à l'autre pour un bassin donné. Aussi, les flux annuels de P total mesurés au bassin versant du ruisseau Ewing en Montérégie, par exemple, varient de plus de 300 %, soit de 1,9 tonne de P en 2004, à 7,0 tonnes de P en 2008 (Madramootoo et al., 2012). Il est donc estimé que les écarts entre flux projetés et observés sur deux années dans le cadre de la présente étude ne sont pas préoccupants, considérant que l'intérêt des prédictions de GéODEP tient principalement à leur valeur relative. En effet, dans une perspective d'accompagnement agroenvironnemental, l'intérêt de l'outil réside dans son pouvoir discriminant des effets des propriétés du paysage et de la gestion du parcellaire sur le devenir du phosphore. La distribution très étendue des taux de pertes de P projetés par GéODEP pour les régies de sol et de culture documentées par les producteurs agricoles du bassin versant et de leurs conseillers traduisent bien la sensibilité du méta-modèle. Les résultats de simulation traduisent aussi l'influence des propriétés des sols à l'échelle du bassin sur les exportations projetées de phosphore. À titre d'exemple, le taux moyen de pertes de P pour la culture de maïs dans le sous-bassin de la Yamaska Nord (1,89 kg/P-ha-an) est 60 % plus élevé que celui de la même culture dans le bassin Ostiguy (1,18 kg/P-ha-an), tel que rapporté précédemment (Tableau 13). En conclusion, il est estimé que le méta-modèle GéODEP a produit un bilan acceptable des flux de sédiments et de phosphore émis dans le bassin versant du lac Boivin. La discrimination dans les projections à l'échelle du champ reflète la sensibilité du méta-modèle aux paramètres de régie des sols et des cultures, de même qu'aux propriétés des sols et du relief. La distribution des projections met également en relief la performance du modèle dans une appréciation intégrée du risque agroenvironnemental, qui permet d'appréhender le cumul de facteurs de risques en lien avec la régie du champ et des propriétés spécifiques du sol.

4.2.3 Projections des flux de sédiments et de phosphore du bassin et des sous-bassins versants du lac Boivin pour le scénario alternatif

En appui à la planification d'actions agroenvironnementales concertées, l'intérêt de GéODEP réside d'abord dans l'identification des zones critiques d'émissions de P à l'échelle de la ferme, puis dans la possibilité d'évaluer différents scénarios d'intervention sur le devenir des charges de P projetées. Dans le cadre de la présente étude, les capacités prédictives de GéODEP ont été mises à l'essai par la génération de scénarios alternatifs de gestion à l'échelle du bassin versant du lac Boivin. L'objectif principal de ce volet d'étude consistait à évaluer la sensibilité du modèle à projeter des réponses de la qualité de l'eau à des scénarios plausibles de gestion, dans le contexte spécifique de systèmes de culturaux et de propriétés des paysages propres au bassin versant. Il est important de spécifier ici que les scénarios générés n'ont fait l'objet d'aucune validation avec les producteurs agricoles. La démarche de la présente étude ne veut en aucun cas se substituer au rôle des conseillers agricoles de la région d'étude dans l'accompagnement des producteurs, et encore moins s'interposer dans le processus décisionnel à la ferme. Une multitude de scénarios peut être générée avec l'outil GéODEP, qui se destine principalement à épauler les démarches confidentielles, ferme par ferme. Il appartient aux producteurs agricoles et à leurs conseillers d'évaluer le potentiel de différents scénarios de gestion élaborés sur mesure aux systèmes culturaux et aux propriétés des sols et du paysage.

Compte tenu du profil de gestion des sols et des cultures partagées par les entreprises du territoire à l'étude, le scénario alternatif de gestion a ciblé trois principaux objectifs, soit :

- **La réduction des taux d'érosion.** Compte tenu de la généralisation du semis direct dans les cultures annuelles dans le bassin versant, les taux projetés de pertes de sol et de phosphore les plus élevés sont associés à la culture du soya, en raison de la faible protection apportée au sol. Aussi, une culture de couverture a été introduite sur l'ensemble des superficies en soya du bassin du lac Boivin, soit 274 ha, de même qu'aux céréales à paille (155 ha) et aux petits fruits (9274 ha). Concrètement, le modèle associerait une réduction similaire des pertes de sols et de P à l'établissement d'une céréale d'automne. Un scénario de renouvellement des prairies qui évite le labour d'automne a également été appliqué (650 ha). Encore ici, l'introduction de la céréale d'hiver permettrait l'établissement d'une couverture anti-érosive avant l'hiver.
- **L'incorporation superficielle des engrais de ferme.** Environ 1 100 ha ont été ciblés par cette mesure, soit principalement des superficies en prairie. Cette pratique vise à éviter que des engrais de ferme soient laissés en surface du sol et ainsi accroissent le risque d'enrichissement du ruissellement de surface en P. Concrètement, l'enfouissement par le labour lors du renouvellement des prairies, l'épandage en post-levée avec dispositifs d'incorporation, le recours aux pendillards, herses à pâturages ou autre instrument de travail superficiel du sol constituent autant d'avenues qui permettent d'éviter les pertes événementielles de P suivant l'épandage.
- **L'aménagement de bandes riveraines élargies et bassins de captage et de sédimentation.** Des bandes de plus de trois mètres ont été attribuées au prorata des superficies en cultures annuelles et de petits fruits (900 ha), complémentées par l'aménagement de structures de captage et de sédimentation.

Tableau 15. Projections des réductions de charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol pour le bassin versant du lac Boivin résultant de l'application du scénario alternatif de gestion agricole.

Classes de cultures	Superficie ha	Charges de MES (kg/an)			Charges de P total (kg P/an)		
		Scénario particulier	Scénario alternatif	Réduction	Scénario particulier	Scénario alternatif	Réduction
Céréales à paille	155	179 641	65 823	63%	232	125	46%
Prairie	4 392	1 233 530	650 332	47%	3 230	2 245	31%
Maïs	443	566 607	294 213	48%	790	521	34%
Soya	29	67 540	29 211	57%	84	47	45%
Petits fruits	274	549 738	166 907	70%	724	338	53%
Total agricole	5 293	2 597 056	1 206 486	54%	5 062	3 275	35%
Total non agricole	15 817	735 436	735 436	0%	3 980	3 980	0%
Total du bassin	21 109	3 332 492	1 941 922	42%	9 041	7 255	20%

Le tableau 15 rapporte les résultats de réductions de charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol pour le bassin versant du lac Boivin, résultant de l'application du scénario alternatif de gestion agricole. Les figures 28 à 30 illustrent, respectivement, les projections des hauteurs de ruissellement, des charges de sédiments et des charges de phosphore issues du scénario alternatif de gestion pour l'ensemble du bassin versant. En théorie, l'application de ce scénario fictif pour le territoire agricole se traduit en une réduction des flux de sédiments projetés par GÉODEP de l'ordre 54 %, et d'une réduction de 35 % des flux de P projetés. Les réductions projetées les plus importantes sont associées aux cultures de soya, soit dans l'ordre de 57 % pour les sédiments et de 45 % pour le phosphore. Ce taux important de réduction reflète la vulnérabilité élevée des superficies en soya au processus d'érosion révélée par la modélisation du scénario particulier de gestion. Le relief accidenté de la zone d'étude n'est pas étranger à cette vulnérabilité et l'efficacité de la culture de couverture à atténuer les processus d'érosion par ruissellement est démontrée.

Les réductions projetées de flux de sédiments (-47 %) et de phosphore (-31 %) dans les prairies reflètent les effets combinés des pratiques anti-érosives (abandon du labour) et de l'incorporation des engrais de ferme. Enfin, l'effet des bandes riveraines et des structures de captage et de sédimentation s'ajoute aux effets des autres composantes du scénario alternatif de gestion des cultures annuelles. Les algorithmes du méta-modèle traduisent alors l'effet des pratiques culturelles de conservation et d'aménagement des terres de façon multiplicative.

Au global, l'application de ce scénario fictif, axé sur le contrôle de l'érosion par ruissellement et les modalités de gestion des engrais de ferme, a démontré la sensibilité du modèle à générer des réponses aux actions simulées. Il s'agit bien sûr d'évaluations théoriques, résultant des algorithmes et hypothèses du méta-modèle GÉODEP. Il est important de souligner que l'efficacité des pratiques alternatives de gestion sur le devenir du phosphore dans les sols et les cours d'eau demeure assurément la composante la plus incertaine de l'outil. En effet, si les charges prédites de P, en situation actuelle, peuvent être validées sur la base de mesures en petits cours d'eau, les prévisions découlant de différentes hypothèses de scénarios ne profitent pas de telles validations. Concrètement, des réponses de la qualité de l'eau aux actions concertées d'entreprises agricoles ont été mesurées en dispositifs expérimentaux de micro-bassins versants dans plusieurs régions agricoles du Québec (Michaud et al., 2005, 2009a, 2017, Madramootoo et al., 2012). L'efficacité d'un bon nombre de pratiques alternatives de gestion requiert cependant des quantifications propres aux conditions de sols, de climat et d'aménagement des terres au Québec. Il est souhaité que les actions d'accompagnement environnementales consenties dans la mise en valeur du lac et du bassin versant du lac Boivin profitent non seulement aux entreprises agricoles et à l'ensemble de la communauté, mais aussi à l'avancement des connaissances, au bénéfice de toutes les communautés rurales qui ont à cœur leurs rivières et leurs lacs.

Ruissellement du bassin versant du lac Boivin

Scénario alternatif 2018

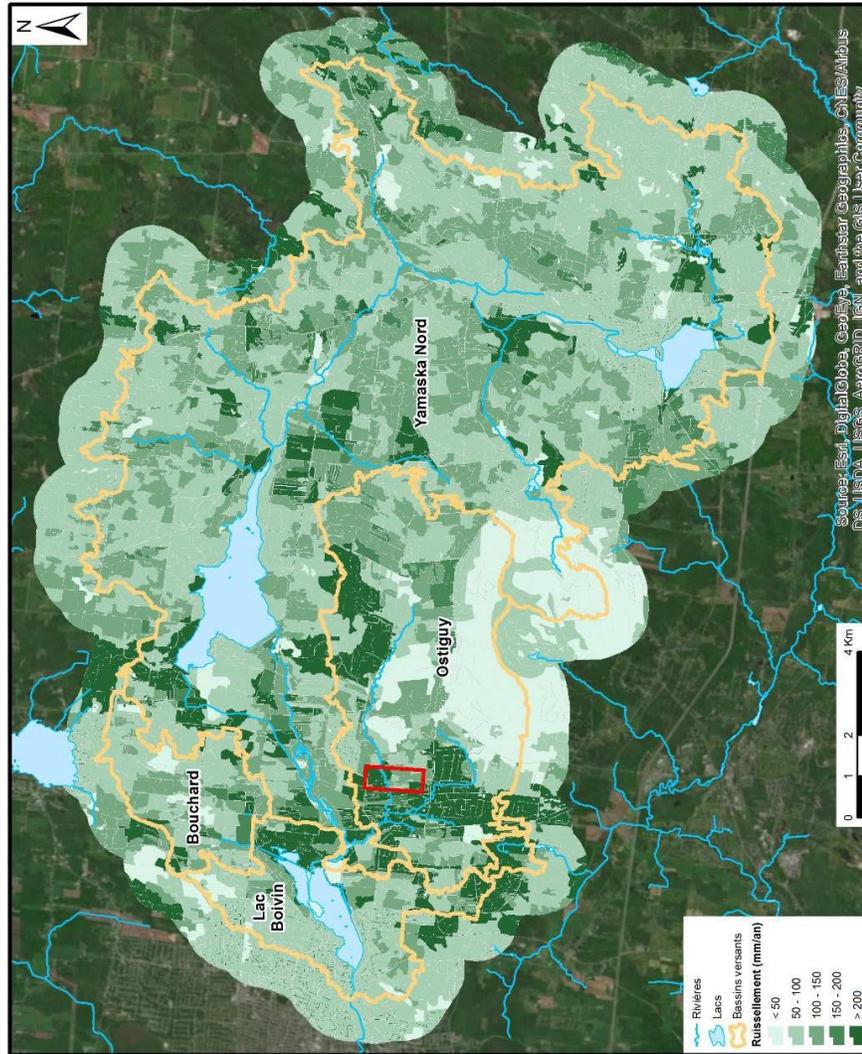
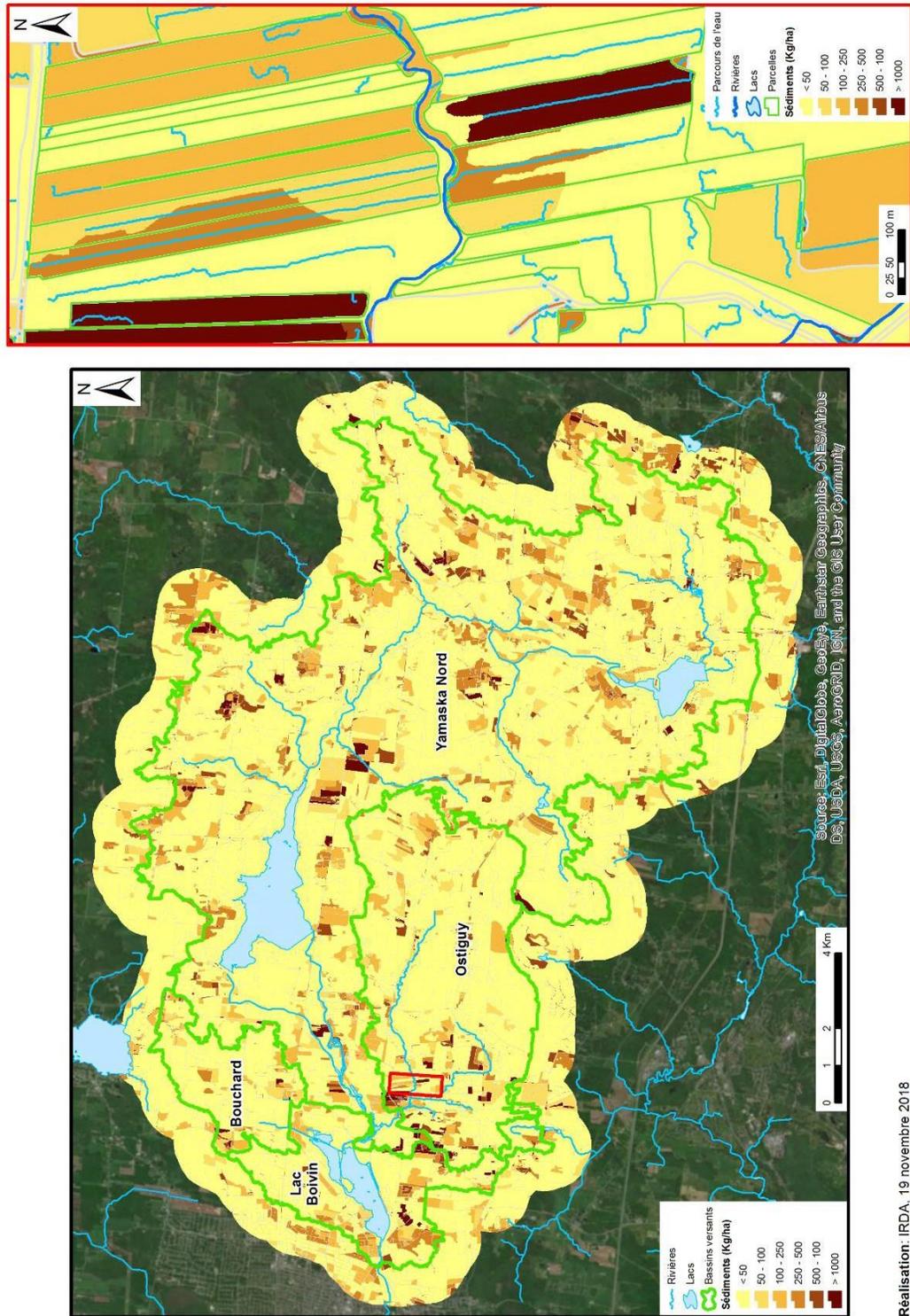


Figure 28. Projection de la hauteur de ruissellement de surface du bassin versant du lac Boivin pour le scénario alternatif de gestion.

Exportation de sédiments du bassin versant du lac Boivin

Scénario alternatif 2018



Réalisation: IRDA, 19 novembre 2018

Figure 29. Projection de la charge de sédiments du bassin versant du lac Boivin pour le scénario alternatif de gestion.

Exportation de phosphore du bassin versant du lac Boivin

Scénario alternatif 2018

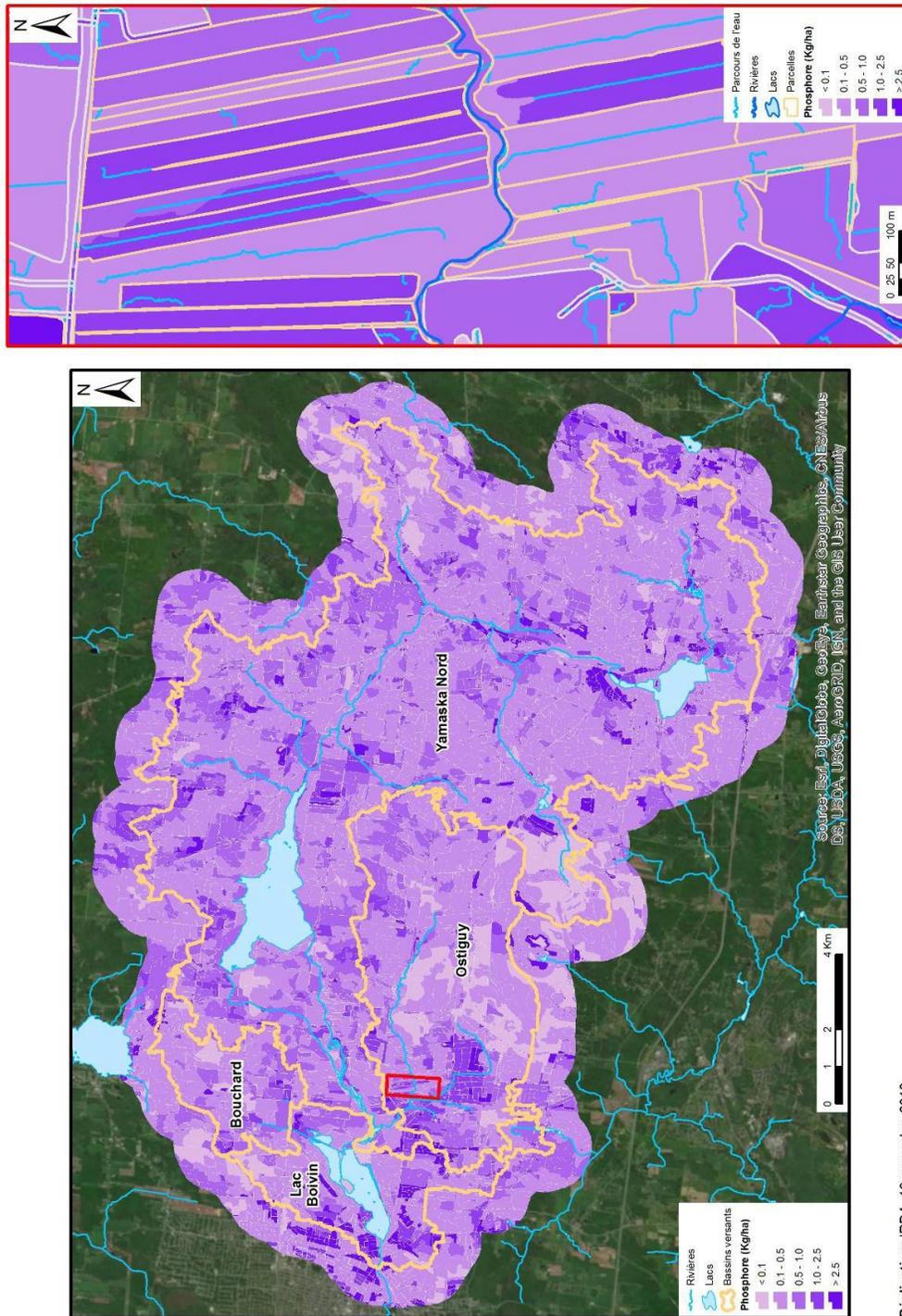
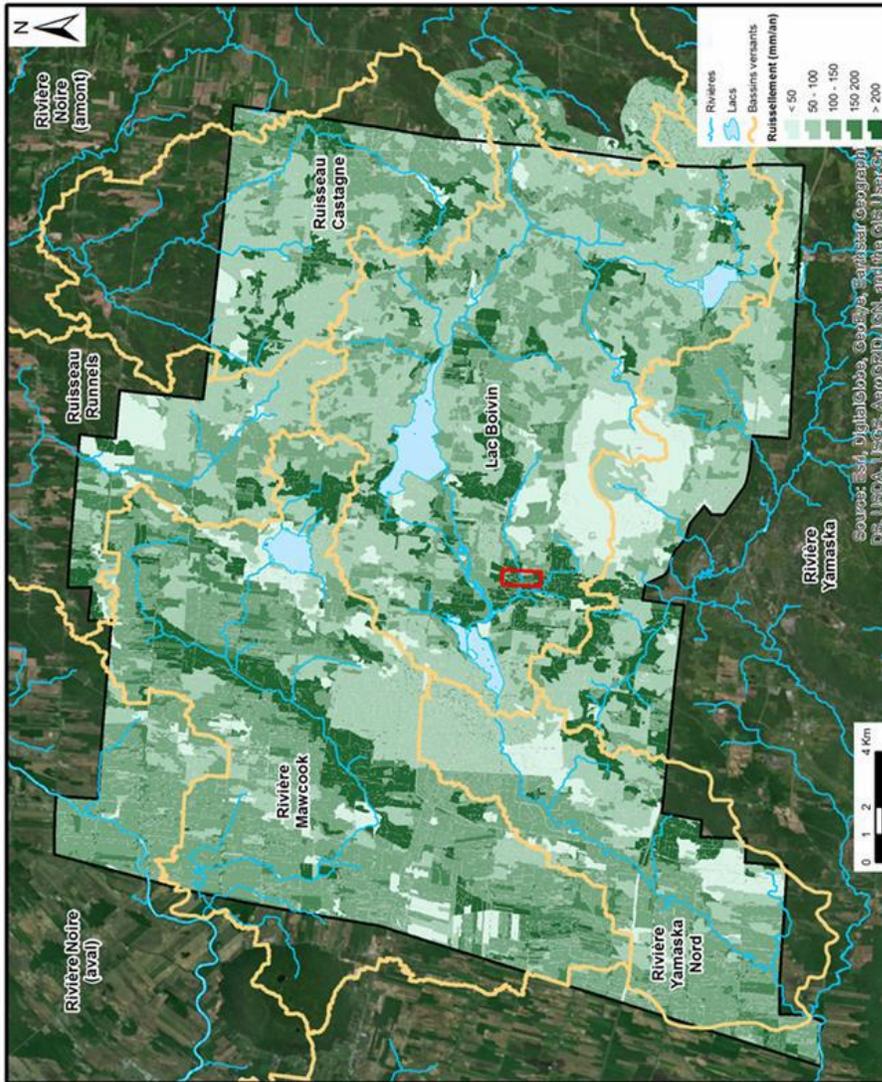
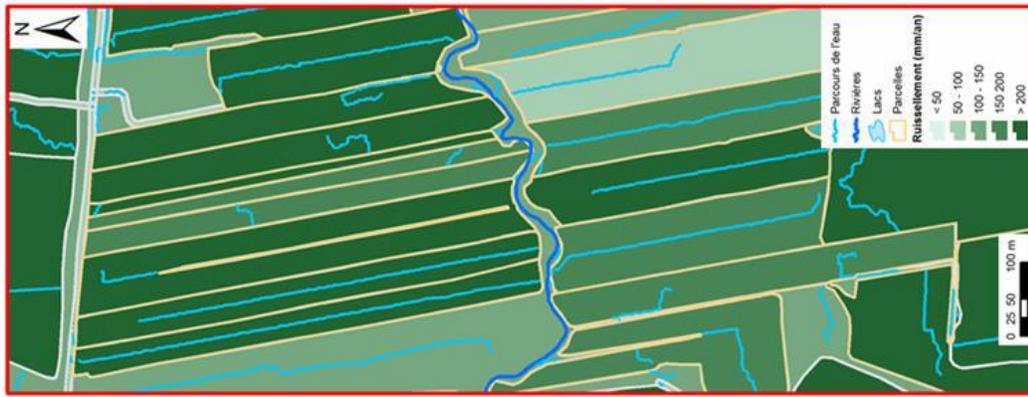


Figure 30. Projection de la charge de phosphore du bassin versant du lac Boivin pour le scénario alternatif de gestion.

4.2.4 Projections des flux de sédiments et de phosphore du territoire de la MRC de La Haute-Yamaska pour le *scénario de référence*

La méthodologie appliquée dans la projection des hauteurs de ruissellement, des pertes de sol et des flux de phosphore pour le bassin versant du lac Boivin a été systématiquement appliquée à l'ensemble du territoire de la MRC Yamaska Nord. Les réseaux hydrographiques des ruisseaux et/ou rivières Castagne, Mawcook, Noire aval, Noire amont et Runnels ont été systématiquement générés suivant une analyse du modèle numérique de haute précision généré par LiDAR à la résolution d'un mètre. Les données colligées par les équipes de l'OBV Yamaska et Gestrie-Sol auprès des entreprises agricoles du bassin versant du lac Boivin ont été reprises dans le paramétrage de GÉODEP par classe de culture.

Les figures 31 à 33 illustrent les projections des hauteurs de ruissellement et des charges annuelles de sédiments et de phosphore pour l'ensemble du territoire de la MRC. Pour le bassin versant du lac Boivin, les résultats de modélisation du scénario particulier de gestion ont été intégralement reproduits. Le tableau 16 cumule les mêmes résultats, regroupés par bassin versant et par classe d'occupation agricole et non agricole du territoire.



Réalisation: IRDA, 19 novembre 2018

Figure 31. Projections de la hauteur de ruissellement de surface des bassins versants de la MRC de La Haute-Yamaska.

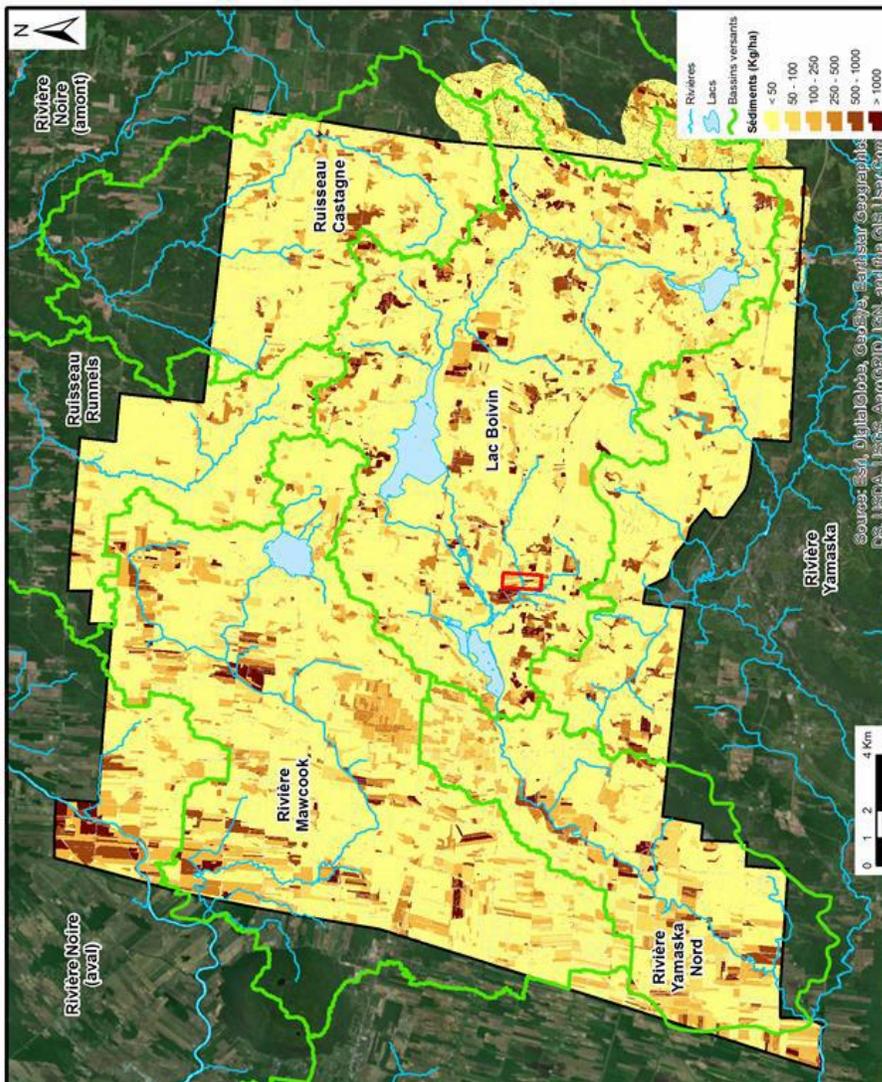
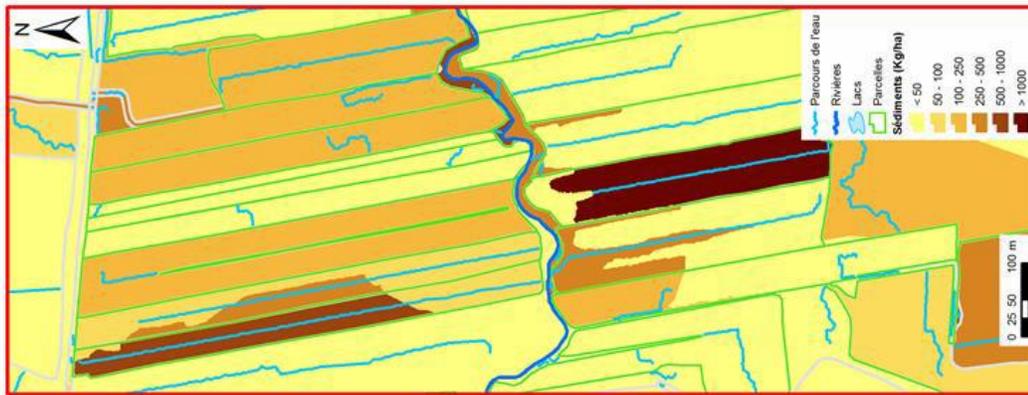


Figure 32. Projections des flux spécifiques de sédiments des bassins versants de la MRC de La Haute-Yamaska.

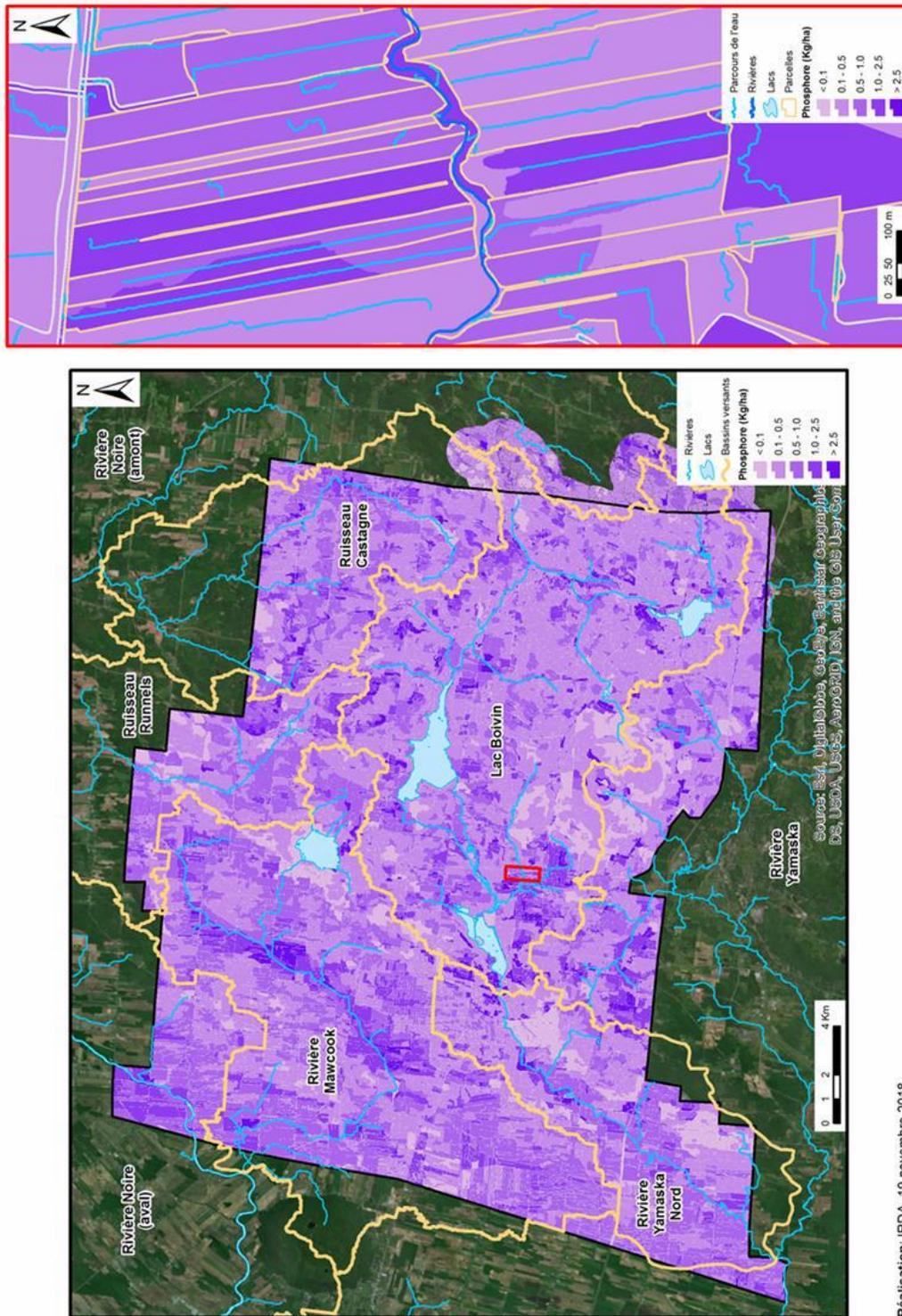


Figure 33. Projections des flux spécifiques de phosphore des bassins versants de la MRC de La Haute-Yamaska.

Tableau 16. Exportations projetées de sédiments et de phosphore par classe d'occupation des sols pour les bassins versants de la MRC de La Haute-Yamaska.

Bassin versant	Superficie		Matières en suspension			Phosphore total		
			Charge annuelle	Charge spécifique		Charge annuelle	Charge spécifique	
	ha	%	kg/an	kg/an-ha	%	kg P/an	kg P/an-ha	%
Yamaska Nord Aval								
Total agricole	2 942	40%	1 689 805	574	66%	2 836	0,964	56%
Total non agricole	4 487	60%	869 443	194	34%	2 217	0,494	44%
Total sous-bassin	7 428	100%	2 559 248	345	100%	5 053	0,680	100%
Yamaska Nord Amont								
Total agricole	2 380	27%	1 217 532	512	57%	3 215	1,351	56%
Total non agricole	6 372	73%	919 291	144	43%	2 568	0,403	44%
Total sous-bassin	8 751	100%	2 136 823	244	100%	5 783	0,661	100%
Castagne								
Total agricole	1 693	24%	476 947	282	60%	1 322	0,781	58%
Total non agricole	5 406	76%	314 062	58	40%	940	0,174	42%
Total sous-bassin	7 099	100%	791 009	111	100%	2 262	0,319	100%
Mawcook								
Total agricole	7 519	44%	3 195 849	425	80%	7 945	1,057	72%
Total non agricole	9 445	56%	801 274	85	20%	3 142	0,333	28%
Total sous-bassin	16 964	100%	3 997 123	236	100%	11 087	0,654	100%
Noire Aval								
Total agricole	1 682	66%	1 186 504	705	95%	2 035	1,210	90%
Total non agricole	883	34%	62 716	71	5%	230	0,260	10%
Total sous-bassin	2 565	100%	1 249 221	487	100%	2 265	0,883	100%
Noire Amont								
Total agricole	1 091	34%	564 531	518	83%	1 067	0,978	74%
Total non agricole	2 087	66%	118 653	57	17%	376	0,180	26%
Total sous-bassin	3 178	100%	683 184	215	100%	1 443	0,454	100%
Runnels								
Total agricole	1 021	25%	276 131	271	51%	1 067	1,045	63%
Total non agricole	3 102	75%	262 739	85	49%	615	0,198	37%
Total sous-bassin	4 122	100%	538 870	131	100%	1 682	0,408	100%
Lac Boivin								
Total agricole	5 285	25%	2 586 576	489	78%	5 040	0,954	57%
Total non agricole	15 824	75%	745 916	47	22%	3 774	0,238	43%
Total sous-bassin	21 109	100%	3 332 492	158	100%	8 814	0,418	100%
Total MRC								
Total agricole	23 789	33%	11 331 974	476	73%	24 116	1,014	65%
Total non agricole	47 908	67%	4 102 739	86	27%	12 971	0,271	35%
Total MRC	71 697	100%	15 434 712	215	100%	37 087	0,517	100%

5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les suivis hydrologiques des bassins Bouchard, Ostiguy et Yamaska Nord ont permis de quantifier leurs flux respectifs de sédiments et de nutriments, de même que la nature du phosphore exporté vers le lac Boivin. De manière globale, toutes proportions gardées, la charge spécifique (par unité de surface) de sédiments, de phosphore et d'azote au lac Boivin est modeste, comparativement à celles documentées pour d'autres secteurs des bassins versants des rivières Yamaska et Richelieu en Montérégie (Michaud et al., 2005, 2009a, 2009b, Madramootoo et al., 2012). Cette pression environnementale modérée tient en bonne partie à la vocation forestière du bassin versant et des systèmes cultureux dominés par les prairies. Ce constat est en soi un important actif pour la mise en valeur du lac Boivin et les autres plans d'eau du bassin versant. La charge externe de P est en effet le principal facteur déterminant du processus d'eutrophisation de ces lacs et cours d'eau.

La superposition des portraits de la qualité de l'eau (suivis hydrométriques) et de la vulnérabilité du territoire aux exportations de P (application GÉODEP) réalisés dans le cadre de la présente étude ont mis en relief deux enjeux qui interpellent particulièrement le secteur agricole. D'une part, la nature soluble du phosphore observé, particulièrement dans le ruisseau Bouchard, témoigne de gains potentiels à réaliser dans la gestion des apports et des stocks de P dans les secteurs du bassin versant à vocation d'élevage plus intensive. D'autre part, le relief accidenté en amont du bassin versant fait en sorte que les superficies dédiées aux cultures annuelles y sont particulièrement vulnérables à l'érosion, et donc associées à un risque élevé d'émission et de transport de phosphore particulaire vers les plans d'eau.

Cette combinaison de facteurs « Sources » et « Transport » propres au bassin versant du lac Boivin illustre bien la nécessaire complémentarité des deux lignes de défense agroenvironnementale à conjuguer en matière de prévention des exportations diffuses de phosphore, soit :

- 1) Agir à la source sur les apports et le stockage de P dans les sols et;
- 2) Prévenir les conditions propices aux transferts de P depuis le champ au ruisseau.

Une revue récente des suivis des effets d'actions centrées sur le contrôle de l'érosion et des charges particulières de P en Amérique du Nord a démontré que les sites de piégeage du P deviennent, à long terme, des sources d'émission de phosphore soluble (Dodd et Sharpley, 2016). Une implication pratique de cet important constat est que la première ligne de défense en matière de prévention de l'eutrophisation des plans d'eau en milieu rural se situe au niveau de la gestion des apports de P et du contrôle de l'enrichissement à long terme des sols. Les engrais de ferme sont principalement ici interpellés pour plusieurs raisons. D'une part, ils constituent la plus large part des apports de P sur les terres de la région, beaucoup plus importante que la contribution des engrais minéraux. Aussi, alors que le P des engrais minéraux est généralement incorporé en bande au moment des semis, les modalités d'apport des engrais de ferme posent un risque plus élevé. Le rapport azote/phosphore (N : P) des engrais de ferme est en effet généralement inférieur à celui des besoins des cultures. Il en résulte que l'apport de P est généralement excédentaire au besoin des cultures pour la saison en cours. La planification de la fertilisation des cultures par les entreprises agricoles et leurs conseillers permet d'équilibrer ces apports dans le temps et d'assurer la capacité du sol à stocker le phosphore.

Dans la situation où l'enrichissement des sols en P devient cependant préoccupant pour les éleveurs et les receveurs d'engrais de ferme d'un secteur donné, il devient alors intéressant d'investir en amont de la chaîne des

ÉTUDE HYDROMÉTRIQUE ET MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

engrais de ferme et de réduire à la source les apports de P. Les systèmes de séparation des fractions solides et liquides du lisier, par exemple, sont largement utilisés en Europe et leur efficacité a aussi été démontrée en porcherie au Québec (Godbout et al., 2006). La fraction liquide, relativement pauvre en P mais riche en azote, peut alors être valorisée au champ en limitant l'enrichissement du sol en P, prévenant ainsi les émissions de P soluble au cours d'eau. Ce lisier « à teneur réduite en P » devient particulièrement avantageux pour le secteur de grains biologiques, vulnérables à l'enrichissement excessif du sol en P en raison d'une utilisation continue d'engrais de ferme. En ce qui a trait à la fraction solide, une richesse élevée en nutriments et un plus faible taux d'humidité en facilitent la valorisation sur des champs plus éloignés, ou hors ferme, suivant la transformation par la voie du compostage ou d'un autre procédé. Dans la perspective où l'intensité des élevages serait appelée à croître dans la région, l'accompagnement des éleveurs dans l'implantation de systèmes de séparation compte assurément parmi les mesures les plus porteuses de résultats tangibles à long terme en matière de prévention de l'eutrophisation des plans d'eau.

Un autre facteur de risque lié aux engrais de ferme tient aux modalités d'épandage. La richesse du ruissellement de surface en phosphore est déterminée essentiellement par la richesse du sol, en fait ses tous premiers centimètres en surface. Lorsque survient un événement de ruissellement de surface, la présence d'engrais de ferme non incorporés dans les champs conduit à d'importantes pertes événementielles de phosphore. L'incorporation des engrais de ferme au moyen d'un travail superficiel du sol élimine en pratique cet important facteur de risque. Considérant le « calendrier » des épisodes de ruissellement documentés dans le cadre de la présente étude, la période d'épandage en pré-semis constitue assurément une période vulnérable, tant en matière d'émission de ruissellement, qu'en matière de compaction de sols humides en profondeur. En alternative, l'épandage en post-lévé des cultures offre l'opportunité de profiter au mieux de la valeur fertilisante azotée de l'engrais de ferme, tout en minimisant le risque de compaction du sol. Il faut néanmoins reconnaître que ces scénarios de gestion posent des défis sur le plan logistique. La convergence des bénéfices agronomiques et environnementaux milite cependant pour le développement et l'accompagnement de ces scénarios de gestion dans une stratégie à long terme de conservation des sols et de l'eau.

Pour les mêmes raisons, il y a avantage à favoriser la période estivale pour l'épandage non incorporé dans les prairies (après coupes), alors que le risque de ruissellement est minimal et la portance du sol optimale. En production de grains, l'introduction de la céréale à paille dans la rotation maïs-soya offre, en post-récolte, une avantageuse fenêtre d'épandage, qui soustrait le sol aux problèmes de compaction. La céréale à paille offre également l'opportunité d'implanter des engrais verts qui vont contribuer à reconditionner la condition physique du sol.

En deuxième ligne de défense agroenvironnementale, la prévention des transferts de phosphore depuis le champ au ruisseau appelle à une saine rotation des cultures et à l'implantation de pratiques culturales de conservation. L'égouttement et la condition physique du sol sont les facteurs les plus souvent rapportés comme déterminants de la productivité des récoltes en Montérégie. Un sol mal égoutté produit moins et ruisselle plus. La culture sur résidus et les cultures de couverture offrent donc des opportunités de reconditionner la condition physique du sol et de réduire l'érosion au champ. Dans la perspective où les superficies en production de grains seraient appelées à croître dans la région, au détriment des superficies en foin, la protection des champs durant la période du dégel printanier deviendrait un enjeu critique, compte tenu de la vulnérabilité très élevée du parcellaire au processus d'érosion documentée dans la présente étude. Si des engrais de ferme interviennent dans le système cultural, il demeure impératif de concilier la protection anti-érosive des résidus de culture ou de la culture de couverture avec l'incorporation superficielle de l'engrais de ferme.

En complément aux pratiques culturales anti-érosives, l'aménagement des terres de la région les plus sensibles à l'érosion offre l'opportunité de concilier l'égouttement optimal du sol avec un contrôle efficace des foyers d'érosion. Les avancées technologiques récentes en matière d'acquisition de données de relief et d'aménagement des terres (GPS, LiDAR, etc.) permettent d'aménager sur mesure le profil des champs et de conduire, puis intercepter le ruissellement dans des structures de captage et de sédimentation. Enfin, rappelons que la branche du cours d'eau est l'épine dorsale de l'égouttement de toutes les terres localisées à son amont. Sa protection est donc un investissement stratégique, dont l'efficacité et la pérennité dépendent des pratiques de l'ensemble des riverains desservis par le cours d'eau. La bande riveraine élargie, qu'elle soit herbacée, arbustive ou brise-vent, est un précieux actif afin de prévenir l'instabilité des talus. L'aménagement des confluences, telle l'implantation de fossés-avaloirs, complète cette protection du cours d'eau. Compte tenu du cadastre allongé des terres, l'analyse des parcours de l'eau à l'échelle des champs de la zone d'étude démontre qu'environ les deux tiers de la superficie des champs s'égouttent par les fossés de drainage, et non par la bande riveraine. Le recours aux structures de captage et de sédimentation permet alors d'influencer ces patrons concentrés de circulation de l'eau dans les champs pour atténuer les pointes de ruissellement de surface et favoriser la rétention de la terre où elle est le plus utile, au champ.

En raison de l'origine diffuse des sources de phosphore dans le lac Boivin, retenons en terminant que les résultats tangibles et à long terme de réduction des apports passent par la combinaison, sur mesure, d'un ensemble de lignes de défense. Ces solutions sont connues et sont le plus souvent « gagnant-gagnant », comportant des bénéfices tant pour les entreprises agricoles que pour la communauté en aval. Le défi se situe dès lors à l'échelle humaine. La concertation de l'ensemble des intervenants de la région et la complémentarité des encadrements technique, financier et réglementaire demeurent les principaux gages de succès. C'est un défi à dimension humaine qui s'inscrit dans l'axe du développement durable, où « la pensée globale et l'agir local » prennent tout leur sens.

RÉFÉRENCES

- Beudet, P., M. Grenier, M. Giroux, V. Girard. 2009. Base de données sur les statistiques des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec.
- Dodd, R.J. et A.N. Sharpley. 2016. Conservation practice effectiveness and adoption: unintended consequences and implications for sustainable phosphorus management. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 104 : 373-392.
- Drouin, A., I. Beaudin et A. Michaud. 2014. GEODEP : l'outil de diagnostic des exportations de phosphore spatialisé. Fiche synthèse, IRDA. 2 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/geodep-l-outil-de-diagnostic-des-exportations-de-phosphore-spatialise/>
- Deslandes, J., I. Beaudin, A. R. Michaud, F. Bonn and C. A. Madramootoo. 2006. Influence of landscape and cropping system on phosphorus mobility within the Pike River watershed of Southwestern Quebec. *Canadian Water Resources Journal* 32(1): 21-42.
- Gagné G., I. Beaudin, M. Leblanc, A. Drouin, G. Veilleux, J.-D. Sylvain et A.R. Michaud. 2013. Classement des séries de sols minéraux du Québec selon les groupes hydrologiques. Rapport final. IRDA, Québec, Canada. 81 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/classement-des-series-de-sols-mineraux-du-quebec-selon-les-groupes-hydrologiques/>
- Géomont, 2010. Acquisition du levé LiDAR 2011 sur le secteur du bassin versant de la rivière Yamaska
- Giroux, M., M. Duchemin, A. R. Michaud, I. Beaudin, C. Landry et M.R. Laverdière. 2008. Relation entre les concentrations en phosphore particulaire et dissous dans les eaux de ruissellement et les teneurs en P total et assimilable des sols pour différentes cultures. *Agrosolutions* 19(1) : Pp 4-14.
- Godbout et al. 2006. Système de séparation liquide/solide des déjections à la source dans un bâtiment porcin et les impacts sur l'environnement https://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/godbout-et-al-2006_rapport_separation_sous_lattes.pdf
- Greenberg, E.A., L.S. Clesceri et A.D. Eaton. 1992a. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C. Standard method for examination of waste and wastewater, 18th edition, pp 2-56.
- Greenberg, E.A., L.S. Clesceri et A.D. Eaton. 1992b. Persulfate Digestion Method. Standard method for examination of waste and wastewater, 18th edition, pp 4-112.
- Greenberg, A.E., S. Lenore et S. Clesceri. 1992c. No: 4500-NH₃ H. Automated Phenate Method, p. 4-84; No: 4500-NO₃-F. Automated Cadmium Reduction Method, p. 4-84, In E. A.D., ed. Standard Methods For Examination of Waste and Wastewater, 18th Edition ed. Corporation Tarrytown, N.Y. 10591.

Greenberg, A.E., S. Lenore et S. Clesceri. 1992d. No: 3030 A, Preliminary Treatment of Samples, p. 3-3, No: 3120, Metals by Plasma Emission Spectroscopy, p. 3-34 – 3-40, In E. A.D., ed. Standard Methods For Examination of Waste and Waste Water, 18th Edition ed. Corporation Tarrytown, N.Y. 10591.

IRDA. 2018. Site WEB. Diffusion/Publications.
<https://www.irda.qc.ca/fr/publications/?EmployeId=80&TypePubId=&LangId=>

Knap, K.M., and W.F. Mildner. 1978. Streambank erosion in the Great Lakes basin: Joint summary technical report. International Joint Commission Reference on Pollution from Land Use Activities Reference Group (IJC-PLUARG) technical report. Great Lakes Reg. Office, Windsor, ON.

Labrie, G., M. Landry et L. Levert-Gauthier. 2018. Portrait des régies des sols et des cultures des entreprises agricoles du bassin versant du lac Boivin. OBV Yamaska et Gestrie-Sol. Base de données à référence spatiale sur support ARCGIS.

La Financière agricole du Québec, 2017. Banque de données des cultures assurées (BDCA) ou des cultures généralisées (BDCG). <https://www.fadq.qc.ca/documents/donnees/base-de-donnees-des-parcelles-et-productions-agricoles-declarees/>

Martel, S., S. Seydoux, I. Beaudin et A.R. Michaud. 2006. Évaluation des effets combinés des principales pratiques de gestion bénéfiques. Revue de littérature réalisée dans le cadre de l'Initiative nationale d'élaboration de normes agroenvironnementales (INENA). 119 pages.
<http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/109.html>

Madramootoo, C. A., A. R. Michaud, J. Whalen et S.-C. Poirier. 2012. Mesures précises et approches innovantes en modélisation de la dynamique des nutriments en bassin et en plan d'eau contribuant aux fleurs des cyanobactéries. Rapport final n° 2009-CY-130646. Programme de recherche en partenariat sur les cyanobactéries. Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies et Fonds de la recherche en santé du Québec. 30 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/mesures-precises-et-approches-innovantes-en-modelisation-de-la-dynamique-des-nutriments-en-bassin-et-en-plan-d-eau-contribuant-aux-fleurs-des-cyanobacteries/>

Martel, S., S. Seydoux, A. R. Michaud et I. Beaudin. 2006. Évaluation des effets combinés des principales pratiques de gestion bénéfiques (PGB). Rapport de recherche, IRDA. 124 p.
<https://www.irda.qc.ca/fr/publications/evaluation-des-effets-combines-des-principales-pratiques-de-gestion-benefiques-pgb/>

Michaud, A.R., Lauzier, R., et M. R. Laverdière. 2005. Mobilité du phosphore et intervention agroenvironnementale en bassin versant agricole : Étude de cas du bassin versant du ruisseau au Castor, tributaire de la rivière aux Brochets, Québec. Agrosol 16(1), pp. 57-59.
https://www.researchgate.net/publication/274762064_Cropping_soil_type_and_manure_application_effects_on_phosphorus_export_and_bioavailability

- Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C. A. Madramootoo. 2007. SWAT-predicted influence of different landscape and cropping systems alterations on phosphorus mobility within the Pike River watershed of South-western Quebec. 2007. Canadian journal of soil science 87(3) 329-344.
- Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beudet et J. Lagacé. 2008. ODEP; un Outil de diagnostic des exportations de phosphore. Manuel de l'utilisateur. Projet « Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec », réalisé dans le cadre de l'Initiative d'appui aux conseillers agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada. <https://www.irda.qc.ca/fr/outils-et-services/odep/>
- Michaud, A.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009a. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), MAPAQ, Club du bassin La Guerre, Dura-Club, Club de fertilisation de la Beauce, Fonds d'action québécois pour le développement durable, Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec et Programme d'aide technique de Couverture végétale du Canada. Québec, Québec, 155 p. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/204.html>
- Michaud, A.R., J. Desjardins, M. Grenier et R. Lauzier. 2009b. Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et au Castor – Dans le cadre du projet Lisière verte. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets, AAC (PASCAA) et MAPAQ, Québec, Québec, 27 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/suivi-de-la-qualite-de-l-eau-des-bassins-versants-experimentaux-ewing-et-aux-castors-dans-le-cadre-du-projet-lisiere-verte/>
- Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport sommaire pour la période de référence 2009-2011. Rapport réalisé dans le cadre du projet Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Québec, Canada. 87 pages et annexes. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/197.html>
- Michaud, A. R., N.-R. Rocha Medrano, R. Lagacé et A. Drouin. 2014. Développement et validation de méthodes de prédiction du ruissellement et des débits de pointe en support à l'aménagement hydro-agricole. Rapport final présenté au CDAQ dans le cadre du PCAA. IRDA. 142 p. <http://www.irda.qc.ca/fr/publications/developpement-et-validation-de-methodes-de-prediction-du-ruissellement-et-des-debits-de-pointe-en-support-a-l-amenagement-hydro-agricole/>
- Michaud, A.R., M. Niang, A. Blais-Gagnon, F. Landry, W. Huertas, J. Desjardins et M. Grenier. 2018. Outil de diagnostic et de prédiction des exportations diffuses de sédiments et de nutriments – GEODEP+N. Rapport scientifique. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Programme Innov'action agroalimentaire. 69 pages.

- Michaud, A.R. J. Desjardins, M. Dubuc, A. Drouin, M. Grenier. 2017. Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles réseau Champlain, Mauricie. Rapport scientifique de projet. 81 pages. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/observatoire-de-la-qualite-de-l-eau-de-surface-en-bassins-versants-agricoles-reseau-champlain-mauricie/>
- Michaud, A.R., M. Niang, A. Blais-Gagnon, W. Huertas, Z. Ipiña et M. Landry. 2018a. Suivi hydrométrique et modélisation hydrologique des sédiments et des nutriments du bassin versant du lac Boivin à Granby. Rapport scientifique final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), OBV Yamaska. 79 pages plus annexes.
- Michaud, A.R., M.A. Niang, A. Blais-Gagnon, F. Landry, W. Huertas, J. Desjardins et M. Grenier. 2018b. Outil de diagnostic et de prédiction des exportations diffuses de sédiments et de nutriments – GéODEP+N. Rapport scientifique de projet N° IA113111, Programme Innov'action agroalimentaire, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 68 pages.
- Michaud, A.R., S-C Poirier et J.K Whalen. 2019. Tile Drainage as a Hydrologic Pathway for Phosphorus Export from an Agricultural Subwatershed. *Journal of Environmental Quality*. 48: 1: 64-72 doi:10.2134/jeq2018.03.0104
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2010. Carte écoforestière.
- Murphy, J., et J.R. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphates in surface waters. *Anal. Acta* 27:31-36.
- OBV Yamaska, 2018. Caractérisation, portrait et plan d'action du bassin versant du lac Boivin – rapport phase I, pour le programme Prime-Vert Volet 2.1, Organisme de bassin versant de la Yamaska, 87 pages
- Roux. C. 2012. Portrait hydrogéomorphologique d'un bassin versant Agricole et processus de ré-méandrisation: Le cas de la Baie de Lavallière au Québec. Department of Fluvial Geomorphology of Concordia University, Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et Département de mécanique de l'Université de Lyon. Montréal. 50 p+ annexes.
- Sharpley, A.N., W.W. Troeger et S.J. Smith. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *J. Env. Qual.* 20:235-238.
- Wall, G.J., D.R. Coote, E.A. Pringle and I.J. Shelton (editors). 2002. RUSLEFAC — Revised Universal Soil Loss Equation for Application in Canada: A Handbook for Estimating Soil Loss from Water Erosion in Canada. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa. Contribution No. AAFC/AAC2244E. 117 pp.
- Walker, W. 1998. Flux, *Stream loads computations, version 5.0*. Environmental laboratory USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi, USA.
- Winchell, M., D. Meals, S. Folle, J. Moore, D. Braud, C. DeLeo et K. Budreski. 2011. Identification of critical sources areas of phosphorus within the Vermont sector of Missisquoi bay basin. Stone Environmental Inc. Project ID 092156-G. For Lake Champlain Basin Program. www.lcbp.org/techreportPDF/63B_Missisquoi_CSA.pdf

ANNEXE A – DONNÉES UTILISÉES EN INTRANT DANS LA CRÉATION DES SCÉNARIOS DE GESTION DE GÉODEP

Données	Description
Culture	Type de culture : céréales (CER), soya (SOYA), maïs-grain (MsG), maïs-ensilage (MsE), prairie à moins de 40 % de légumineuse (Pr), prairie à moins de 40 % de légumineuse (LUZ), maraîchage (LEG).
Antécédent culture	Type de culture qui précédait la culture en place (mêmes types de cultures)
Travail du sol	Type de travail du sol : labour à l'automne + travail secondaire au printemps (1), chisel ou pulvérisateur à l'automne + travail secondaire au printemps (2), déchaumage au printemps + travail second. au printemps (3) et semis-direct ou billons (4)
Couverture associée	Présence ou non de culture de couverture associée
Couverture dérobée	Présence ou non de culture de couverture à la dérobée
Minéraux P rang	Apports de P minéral appliqué en bande (kg P ₂ O ₅ /ha)
Minéraux volée	Apports de P minéral appliqué à la volée (kg P ₂ O ₅ /ha)
Fum1 P dose	Apports d'engrais de ferme (dose 1) (kg P ₂ O ₅ /ha)
Fum1 P période	Période d'épandage de la dose 1 : pré-semis (1), post-levée (2), automne hâtif (3) et automne tardif (4)
Fum1 P délai	Délai d'incorporation de la dose 1 : inférieur à 48 heures (1), de 48 heures à 1 semaine (2), supérieur à 1 semaine (3) et non incorporé (4)
Fum2 P dose	Apports d'engrais de ferme (dose 2) (kg P ₂ O ₅ /ha)
Fum2 P période	Période d'épandage de la dose 2 : pré-semis (1), post-levée (2), automne hâtif (3) et automne tardif (4)
Fum2 P délai	Délai d'incorporation de la dose 2 : inférieur à 48 heures (1), de 48 heures à 1 semaine (2), supérieur à 1 semaine (3) et non incorporé (4)
Fum3 P dose	Apports d'engrais de ferme (dose 3) (kg P ₂ O ₅ /ha)
Fum3 P période	Période d'épandage de la dose 3 : pré-semis (1), post-levée (2), automne hâtif (3) et automne tardif (4)
Fum3 P délai	Délai d'incorporation de la dose 3 : inférieur à 48 heures (1), de 48 heures à 1 semaine (2), supérieur à 1 semaine (3) et non incorporé (4)
P Mehlich	Contenu en P Mehlich-3 de la couche arable (mg/kg)
% sat P/Al	Pourcentage de saturation P/Al Mehlich-3 (%)
Bande riveraine	Présence et largeur de la bande riveraine : ne s'applique pas (1), moins de un mètre (2), de un à trois mètres (3) et plus de trois mètres (4)
Avaloir	Présence de structures de contrôle du ruissellement (avaloirs) : absentes (1), captage partiel (2) et captage total (3)
Drainage souterrain	Présence de drainage souterrain : systématique (1), partiel (2) et absent (3)
Écoulement de surface	État du drainage de surface : bon (1), moyen (2) et déficient (3)
Condition hydro	Condition hydrologique du profil cultural : bonne (1), présence de zones à risque (2) et dominance de zones à risque (3)
Pente	Pente de la parcelle (%)
Longueur parcours	Longueur du parcours de l'eau (m)
Sable %	Contenu en sable de la couche arable (%)
Argile %	Contenu en argile de la couche arable (%)
Gr_hydro	Groupe hydrologique du sol non drainé (3, 5, 7 ou 9)
MO	Contenu en matières organiques de la couche arable (%)
Ptot naturel	Contenu en P total naturel du sol (mg/kg)

ANNEXE B – MÉTHODE D'ESTIMATION DE LA CHARGE DE PHOSPHORE LIÉE À LA PERTE ÉVÉNEMENTIELLE SUIVANT DES ÉPANDAGES D'ENGRAIS DE FERME NON INCORPORÉS

Attention : cette routine de calcul ne s'applique que dans le cas où des engrais de ferme ne sont pas incorporés (Classe de délai d'incorporation = 4; non incorporé).

L'enrichissement du ruissellement en P dissous ($P_{diss_{EF}}$) suivant l'épandage non incorporé d'engrais de ferme est estimé en deux étapes.

- 1) Dans un premier temps, la concentration du ruissellement en P réactif dissous (PRD) est estimée sur la base du taux de saturation du sol, sans considérer l'effet de l'amendement (Giroux et al., 2008; Michaud et al., 2009);

$$PRD_{SOL} = 17,1 * (P/AI * 100) + 40$$

Où :

- PRD_{SOL} (ug/l), est la concentration estimée par GÉODEP, sans prise en compte de l'amendement;
- P/AI (%) est l'indice de saturation en phosphore.

- 2) En deuxième étape, la concentration en PRD du ruissellement de surface résultant de l'application non incorporée de l'engrais de ferme est estimée sur la base du taux d'application de ce dernier.

$$PRD_{EF} = (1,55 (P_{diss_{SOL}}) + 182) * (Dose_FUM_P2O5 * 0,4364/59) * F_{Période}$$

Où :

- PRD_{EF} est la concentration du ruissellement en P dissous (ug/l) considérant l'apport non incorporé de l'engrais de ferme;
- Dose_FUM : est la dose de P (kg P2O5) provenant de l'engrais de ferme (le facteur 0,4364 convertit les unités d'apports en P2O5 dans GÉODEP en P);
- $F_{Période}$ est le facteur de période (printemps et automne : valeur de 1; été et automne hâtif : valeur de 0,5).

Cette équation empirique permettant d'estimer l'enrichissement en P du ruissellement de surface a été développée sur la base des résultats d'étude en parcelles au champ sous simulateur de pluie en Montérégie (Michaud et Laverdière, 2004). Le dispositif expérimental sous conditions contrôlées de précipitations (sous simulateur de pluie) en 36 parcelles (18 prairies et 18 sol nu) pour trois séries de sol aux propriétés physico-chimiques contrastées a permis de générer des fonctions d'enrichissement du ruissellement en réponse à l'apport d'engrais de ferme non incorporé. La figure A1 illustre les observations colligées dans le réseau d'étude qui mettent en relation les richesses moyennes du ruissellement en P dissous avec ou sans application d'engrais de ferme, sur sol nu comme sur prairie. Un facteur de diminution de la vulnérabilité à l'exportation de P de l'ordre de 50% a par ailleurs été attribué aux apports d'engrais de ferme en période estivale, comparativement à des épandages réalisés en période de pré-semis (printemps) ou de post-récolte (automne), considérés plus à risque de mobilisation du P.

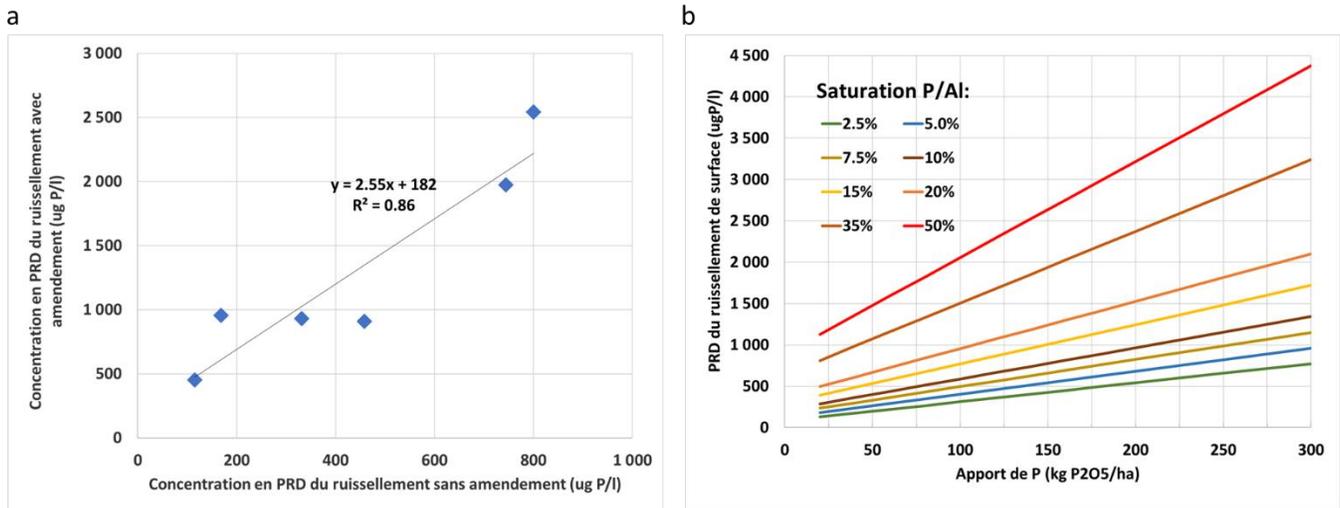


Figure A.1. Relation linéaire entre les observations de richesses du ruissellement de surface en P réactif dissous suivant un traitement de lisier non incorporé (128 kg P₂O₅/ha) et sans amendement pour un ensemble de 36 parcelles sous prairie et sol nu (a), et projection de de la richesse en P réactif dissous du ruissellement de surface résultant d'apports croissants de P provenant d'engrais de ferme non incorporés en fonction de la saturation initiale du sol en P (Adapté de Michaud et Laverdière, 2004).