

RAPPORT FINAL

SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES SÉDIMENTS ET DES NUTRIMENTS DU BASSIN VERSANT DU LAC BOIVIN À GRANBY

VOLET I. SUIVI HYDOMÉTRIQUE DES BASSINS VERSANTS BOUCHARD,
OSTIGUY ET YAMASKA NORD

VOLET II. MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS
BOUCHARD, OSTIGUY, YAMASKA NORD ET LAC BOIVIN

26 MARS 2018

PARTENAIRES DE RÉALISATION



SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES SÉDIMENTS ET DES NUTRIMENTS DU BASSIN VERSANT DU LAC BOIVIN À GRANBY

Présenté à :

Ville de Granby

Monsieur Serge Drolet, coordonnateur de la Division environnement

87, rue Principale

Granby (Québec), J2G 2T8

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Aubert Michaud, Ph. D., IRDA
- Mohamed Abou Niang, IRDA
- Arianne Blais Gagnon, IRDA
- François Landry, IRDA
- William Huertas, IRDA
- Zoë Ipiña, OBV Yamaska
- Michel Landry, OBV Yamaska
- Jacques Desjardins, IRDA
- Michèle Grenier, IRDA

COLLABORATEURS

- Alex Martin, OBV Yamaska
- Laurianne Levert-Gauthier, Gestrie-Sol
- Isabelle Martineau, Gestrie-Sol

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Michaud, A.R., M. Niang, A. Blais-Gagnon, W. Huertas, Z. Ipiña et M. Landry. 2018. *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. 83 pages.

Résumé

La présente étude s'inscrit dans le cadre du *Plan d'action pour l'avenir du lac Boivin* de la Ville de Granby. L'objectif principal de l'étude consistait à caractériser les apports de nutriments au lac Boivin, en vue de cibler les secteurs prioritaires du bassin versant et y appuyer la planification d'actions environnementales. L'étude a été réalisée en deux volets, soit une étude hydrométrique, ciblée sur l'observation des cours d'eau, et une étude de modélisation hydrologique, ciblée sur la caractérisation de la vulnérabilité du bassin versant aux émissions de phosphore.

Le volet d'étude hydrométrique a soutenu la mise en place et l'opération de trois stations hydrométriques localisées sur la Yamaska Nord (185 km²), l'Ostiguy (37 km²) et le ruisseau Bouchard (10 km²). Les dispositifs en place ont permis de caractériser et de différencier les réponses hydrologiques des cours d'eau au moyen de l'observation en continu de leurs débits, de même que de leur signature géochimique (conductivité et turbidité). Ces observations ont été complétées par des prélèvements d'échantillons d'eau, principalement lors des crues, pour en déterminer les teneurs en sédiments et en nutriments au laboratoire. L'intégration des mesures en continu et des observations ponctuelles de la qualité de l'eau a permis de décrire de façon détaillée les débits et les flux de sédiments et de nutriments des cours d'eau à l'étude.

Sur une base annuelle, les charges spécifiques (kg/ha) de sédiments ont été estimées à 58, 82 et 111 kg MES/ha, respectivement, pour les bassins Yamaska Nord, Ostiguy et Bouchard. Ces taux demeurent relativement bas, comparés aux taux d'exportation mesurés dans d'autres micro-bassins versants de la Montérégie à vocation agricole. Ils s'expliquent par la prédominance de l'occupation forestière du territoire et l'importance des superficies en culture dédiées aux fourrages pérennes. De manière globale, la charge de sédiments au lac Boivin mesurée pour la période d'étude est de l'ordre de 1,200 tonnes, rapportée sur une base annuelle.

La charge annuelle estimée de phosphore total au Lac Boivin se situe pour sa part à 8,5 tonnes par an. La charge spécifique du ruisseau Bouchard (0,9 kg P/ha-an) est près du double de celles estimées pour la Yamaska Nord (0,4 kg P/ha-an) et Ostiguy (0,5 kg P/ha-an). L'occupation agricole du sol, relativement plus importante dans le bassin versant du ruisseau Bouchard, de même qu'une proportion relativement plus importante de cultures annuelles dans les systèmes de culture expliqueraient en partie cette vulnérabilité plus élevée aux exportations de P. Le ruisseau Bouchard se distingue aussi quant à la nature plus soluble du P exporté. L'enrichissement de l'eau du ruisseau en phosphore dissous et réactif, de même que la richesse des sédiments traduisent vraisemblablement des apports spécifiques plus élevées en P et l'enrichissement des sols en P qui en découle.

Les charges annuelles spécifiques de nitrates ont été estimées à 3,5 kg N/ha aux bassins Ostiguy et Yamaska Nord, contre 5,1 kg N/ha-an au bassin Bouchard. Ces flux de nitrates relativement peu élevés, en comparaison d'autres bassins documentés en Montérégie, sont aussi redevables à l'importante occupation forestière des territoires des trois bassins versants à l'étude.

Le deuxième volet d'étude, dédié à la modélisation hydrologique, a supporté une représentation de la vulnérabilité du territoire agricole aux exportations de phosphore en amont du lac Boivin. L'outil de diagnostic spatialisé des exportations de phosphore (GÉODEP) a été mis à profit pour cet exercice appliqué à l'ensemble du bassin versant du lac Boivin. Dans une perspective d'appui à la planification d'actions concertées ciblées sur la réduction des exportations de phosphore, l'intérêt de l'outil GÉODEP réside d'abord dans l'identification des zones les plus à risque de mobilisation de P, puis dans la possibilité d'évaluer différents scénarios d'intervention sur le devenir des charges de P émises. L'étude comprend également une représentation du risque d'érosion des fossés de route et des cours d'eau, basée sur l'analyse du relief et l'érodabilité des sols du territoire à l'étude. 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 (1m) et mis à la disposition des promoteurs du projet.

Globalement, à l'échelle de la zone d'étude, les indices de risque d'exportation de P ont été estimés pour plus de 20,400 unités de calcul. La répartition des indices par classe d'occupation du territoire attribue 60% 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 occupations forestières (60% de la superficie) et urbanisées (8% de la superficie) sont associées, respectivement, à 22 et 15 % 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 2,60 kg P/ha-an pour les superficies en maïs, à 0,66 kg P/ha-an pour la prairie. La variabilité des propriétés des sols et du relief à l'échelle du bassin contribue aussi à la discrimination spatiale dans les exportations prédites de phosphore. Le risque d'exportation de P pour la culture de maïs dans le sous-bassin Yamaska Nord est en moyenne (2,88 kg/P-ha-an) deux fois plus élevé que celui estimé pour le ruisseau Bouchard (1,44 kg/P-ha-an). Au final, la distribution spatiale des indices de vulnérabilité aux exportations de phosphore indique qu'environ 20% du territoire est associé à 50% des exportations de phosphore.

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. 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 met en relief deux enjeux qui interpellent particulièrement le secteur agricole.

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 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 sont appelés à jouer un rôle important dans la préservation de la qualité des sols et des plans d'eau.

Table des matières

1	Mise en contexte	10
2	Présentation de l'équipe de travail.....	11
3	Volet d'étude hydrométrique	13
3.1	Objectifs	13
3.2	Méthodologie et résultats.....	14
3.2.1	Description des sites d'étude.....	14
3.2.2	Opération des stations hydrométriques.....	21
3.2.3	Campagnes d'échantillonnage des cours d'eau	23
3.2.4	Dépouillement des données hydrométriques	26
3.3	Conclusion du volet de suivi hydrométrique	46
4	Volet II : Modélisation hydrologique	47
4.1	Objectifs	47
4.2	Méthodologie et résultats.....	47
4.2.1	Paramétrage du modèle	48
4.2.2	Résultats de l'estimation des risques d'exportation de sédiments et de phosphore.....	62
4.2.3	Indexation du groupe hydrologique des sols et indices de risque d'érosion des cours d'eau et fossés.....	68
4.3	Conclusions du volet de modélisation hydrologique.....	70
5	Conclusion et recommandations	72
6	Références citées	76
	Annexe I. Données utilisées en intrants dans la création de scénarios de gestion dans GÉODEP.	80
	Annexe II. Indices de risques d'exportation de sédiments et de phosphore pour le territoire agricole de la ville de Granby.	81
	Scénario de référence.....	81
	Scénario de conservation.....	82
	Scénario « Tout maïs ».....	83

Liste des tableaux

Tableau 1. Élévations et pentes dans les bassins étudiés	16
Tableau 2. Série, texture et qualité du drainage des sols des bassins expérimentaux	17
Tableau 3. Occupation et utilisation du territoire des trois bassins.....	18
Tableau 4. Répartition des cultures sur le territoire des bassins à l'étude.	18
Tableau 5. Détail des équipements par site.	21
Tableau 6. Charges annuelles spécifiques (365 jrs, base ha) de calcium, de matières en suspension, d'azote et de phosphore estimées pour les trois bassins versants à l'étude.	36
Tableau 7. Spéciation des formes de phosphore estimée pour les charges des trois bassins versants à l'étude.	37
Tableau 8. Moyennes des concentrations 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.	45
Tableau 9. Superficies des principales classes d'occupation du sol de la zone d'étude.	51
Tableau 10. Hypothèses de gestion du parcellaire agricole retenues pour l'estimation des risques d'exportations de sédiments et de phosphore dans GÉODEP à l'échelle du bassin versant du Lac Boivin.	61
Tableau 11. Répartition des exportations prédites de sédiments et de phosphore par classe d'occupation des sols pour le scénario de référence appliqué aux bassins versants du Lac Boivin, de la Yamaska Nord, du ruisseau Ostiguy et du ruisseau Bouchard.	67

Liste des figures

Figure 2. Aperçu des sites des stations Bouchard (a), Ostiguy (b) et Yamaska Nord (c)..	16
Figure 3. Utilisation du territoire des trois bassins versants à l'étude.	19
Figure 4. Répartition des cultures assurées de l'ensemble des bassins étudiés (BDCA, 2017).	20
Figure 5. Installation des équipements à la station Bouchard.	21
Figure 6. Jaugeage de la station Ostiguy à l'hiver 2017.....	22
Figure 7. Mesures du débit instantané à la station Bouchard.....	23
Figure 8. Stations d'échantillonnages, 2016-2017.....	24
.....	25
Figure 9. 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).	25
Figure 10. 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.	28
Figure 11. Séries chronologiques des débits spécifiques et des précipitations journalières observés aux trois stations pour la période 2016-2017.	29
Figure 12. Séparation de l'écoulement de surface et souterrain pour le cours d'eau Bouchard.	30
Figure 13a. 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.....	32
Figure 13b. 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	33
Figure 13c. 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	34
Figure 14a. 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.....	39

Figure 14b. 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.	40
Figure 14c. 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.	41
Figure 15. Charges et spéciation des formes de phosphore observées aux exutoires des trois bassins versants à l'étude.	42
Figure 16. Modèle numérique d'altitude généré de la zone d'étude.	53
Figure 17. Hydrographie du bassin versant de la zone d'étude (MRN, 2010).	54
Figure 18. Délimitation des sous-bassins hydrographiques du bassin versant du Lac Boivin et de la zone d'étude.	55
Figure 19. Cartographie pédologique des sols de la zone d'étude.	56
Figure 20. Richesse moyenne en P assimilable (Mehlich-3) des sols agricoles des municipalités de la zone d'étude (Beaudet et al., 2009).	57
Figure 21. Illustration des différentes étapes de traitement des données à référence spatiale dans GéODEP pour une portion de territoire à vocation agricole.	59
Figure 22. Indices de risques d'exportation de sédiments et de phosphore à l'échelle du bassin versant du Lac Boivin selon le scénario de référence, le scénario de conservation des sols et le scénario de culture de maïs sous labour.	66
Figure 23. Indices de risque d'érosion des fossés et des routes à l'échelle du bassin versant du Lac Boivin.	69
Figure 24. Numéros de courbe hydrologique associée au scénario de gestion de référence à l'échelle du bassin versant du Lac Boivin.	70

1 MISE EN CONTEXTE

Symbole fort de la Ville de Granby, le lac Boivin fait partie du quotidien des Granbyens et des Granbyennes depuis plusieurs décennies déjà. Toutefois, le lac Boivin rencontre des difficultés importantes sur le plan environnemental. Dans un souci d'offrir à ses citoyens une qualité de vie hors pair et afin d'orienter ses futures interventions, la Ville de Granby a choisi de se doter d'un Plan d'action pour l'avenir du lac Boivin. L'OBV Yamaska a collaboré à l'élaboration de ce plan qui propose 72 actions sur 15 ans pour une gestion durable du lac et de son bassin versant. Pour la réalisation du plan, la Ville de Granby réalisera des investissements de près de 2,5 millions. Il est important de bien cibler les priorités et les secteurs à choisir pour réaliser ces investissements.

À l'intérieur du *Plan d'action pour l'avenir du lac Boivin*, la Ville de Granby vise à mieux connaître les apports de nutriments au lac afin de cibler les secteurs prioritaires pour des interventions terrain. Dans cet objectif, l'OBV Yamaska a proposé l'expertise de l'IRDA et Gestrie-sol dans un projet de caractérisation des sources de phosphore (P) au lac Boivin au moyen de mesures des flux de P en provenance des différents affluents du lac, de même que par la réalisation d'une cartographie de la vulnérabilité du territoire aux exportations diffuses de phosphore (modélisation hydrologique GÉODEP).

Ce projet répond aux objectifs des deux actions suivantes du Plan d'action pour l'avenir du lac Boivin relativement au suivi du phosphore et des matières en suspension :

- Procéder à l'identification des secteurs problématiques d'où proviennent des sources ponctuelles ou diffuses d'apports en éléments nutritifs (6.1.3);
- Échantillonner et analyser les affluents du lac Boivin afin de déterminer la présence de divers contaminants tels que phosphates, matières en suspension et coliformes fécaux (6.1.5).

Le projet proposé s'inscrit dans la mise en œuvre du PDE de l'OBV Yamaska. Il s'agit d'un premier projet ciblé sur la mise en valeur du lac Boivin réalisé en collaboration avec une équipe de recherche scientifique. Le caractère innovateur du projet tient à sa démarche qui allie la mesure en continu des débits et de la qualité de l'eau de différents affluents du lac, avec un exercice de modélisation hydrologique permettant de localiser et de quantifier les risques d'exportation diffuse de sédiments et de phosphore. L'échantillonnage des crues des cours d'eau du bassin versant, une démarche inédite dans la région d'étude, permet de quantifier les flux de sédiments et de phosphore au lac Boivin et supporte la validation des estimations de l'Outil Diagnostique des Exportations de Phosphore (GÉODEP).

En marge de la réalisation de l'application GÉODEP, des indicateurs du risque d'érosion hydrique des fossés de route et des cours d'eau sont également projetés à l'échelle du bassin versant, de même que les données géospatiales requises dans l'établissement des critères hydrologiques de conception des ouvrages hydrauliques (bassins de captage et de sédimentation, tranchées filtrantes, seuils, etc.) ou l'aménagement des fossés et cours d'eau.

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 du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) 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 Diagnostique 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 20 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, de même que la production des indices de risque d'érosion des fossés et cours d'eau et la cartographie des classes de réponse hydrologique (numéro de courbe CN).

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.

3 VOLET D'ÉTUDE HYDROMÉTRIQUE

Le premier volet de ce rapport présente les résultats du suivi hydrométrique réalisé pour la période d'octobre 2016 à novembre 2017 (407 jours) auprès de trois cours d'eau du bassin versant du Lac Boivin, soit les ruisseaux Bouchard et Ostiguy, de même que le cours principal de la rivière Yamaska Nord. 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.

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 sont les suivants :

- **Caractériser les problématiques de contamination diffuse de l'eau des principaux tributaires du Lac Boivin.** La méthodologie appliquée supporte la quantification des flux de sédiments et de nutriments, de même que l'interprétation des principaux facteurs déterminants de leur modulation, soit le régime hydrique, les saisons, les propriétés du paysage et des sols de même 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 phosphore vers les plans d'eau. La variabilité dans les quantités et les formes de phosphore exporté, de même que la distribution des flux observés dans le temps (saisonnalité) et dans l'espace (variabilité spatiale) sont autant d'indices utiles dans l'identification des pratiques culturales et d'aménagements des terres les mieux adaptés aux problématiques soulevées. Enfin, les observations hydrométriques colligées aux trois stations hydrométriques fournissent une base de validation des prédictions des outils de représentation des risques environnementaux, tel que l'Outil diagnostique des exportations de phosphore (GÉODEP) mis à profit dans le cadre du deuxième volet de cette étude.

3.2 Méthodologie et résultats

Le dispositif d'études des trois bassins versants s'appuie sur l'opération de stations hydrométriques qui colligent 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 sont complétées par des prélèvements d'échantillons d'eau, principalement lors des crues des cours d'eau, qui seront éventuellement analysés au laboratoire pour en déterminer les composantes physico-chimiques. L'intégration des relevés des observations en continu et des résultats de dosages au laboratoire analytique permet par la suite, à l'étape du post-traitement des données, de décrire de façon détaillée les débits et les flux de sédiments et de nutriments des cours d'eau à l'étude.

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 18,523 ha. Ce dernier chevauche les municipalités de Granby, Canton de Shefford, Waterloo, Warden, Stukely-Sud, Sainte-Anne-de-la-Rochelle, Saint-Joachim-de-Shefford et Roxton Pond. Le deuxième site instrumenté se trouve sur le cours d'eau Ostiguy, un sous-bassin de la Yamaska Nord. Ce sous-bassin versant couvre une superficie de 3,654 ha et chevauche les municipalités de Granby, Canton de 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, Canton de Shefford et Roxton Pond. Les délimitations des bassins versants en amont de chaque station hydrométrique sont illustrées en figure 1. La figure 2 offre un aperçu des trois sites où sont situées les stations hydrométriques.

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 5,14% et 7,65% 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.

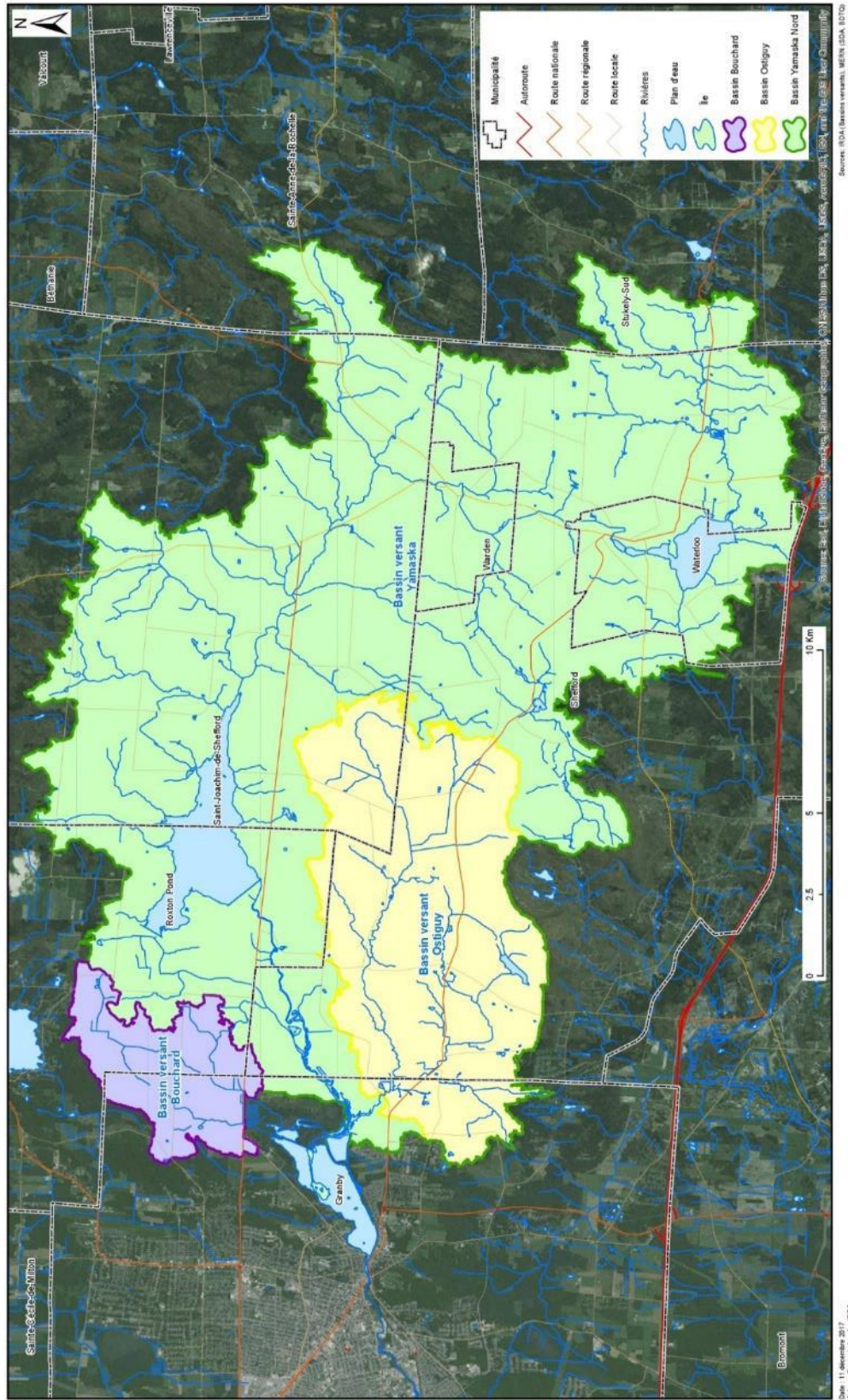


Figure 1. Localisation des stations de suivi hydrométrique et de leurs bassins versants en amont.



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

Tableau 1. Élévations et pentes dans les bassins étudiés

	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 bassins expérimentaux

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 (figure 3 et 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 occupe la plus large part des superficies, soit environ 85% de superficies associées à l'occupation agricole. La figure 4 illustre la distribution spatiale des principales classes d'occupation des sols pour l'ensemble du Lac Boivin, incluant les sous-bassins des trois stations hydrométriques.

Tableau 3. Occupation et utilisation du territoire des trois bassins.

	Bouchard		Ostiguy		Yamaska		Lac Boivin	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Agricole	430	42,9	991	27,1	4,452	24,0	6,912	23,3
Urbanisé	28	2,8	548	15,0	1,583	8,5	3,245	10,9
Forêts	536	53,5	2,010	55,0	11,263	60,7	17,774	59,8
Autres	8	0,8	106	2,9	1,248	6,7	1,779	6,0
Total	1,002	100	3,655	100	18,545	100	29,710	100

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

Tableau 4. Répartition des cultures sur le territoire des bassins à l'étude.

Cultures	Bouchard		Ostiguy		Yamaska		Lac Boivin	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Autres cultures	6	1,4	0	0,0	1	0,0	7	0,1
Céréales à paille	0	0,0	7	0,7	38	0,9	38	0,5
Foin	365	84,9	862	87,0	3,868	86,9	6,232	90,2
Maïs	41	9,5	57	5,8	335	7,5	394	5,7
Mixtes	0	0,0	6	0,6	66	1,5	71	1,0
Petits fruits	13	3,0	0	0,0	0	0,0	20	0,3
Soya	5	1,1	58	5,9	144	3,2	149	2,2
Total agricole	430	100	991	100	4,452	100	6,912	100

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

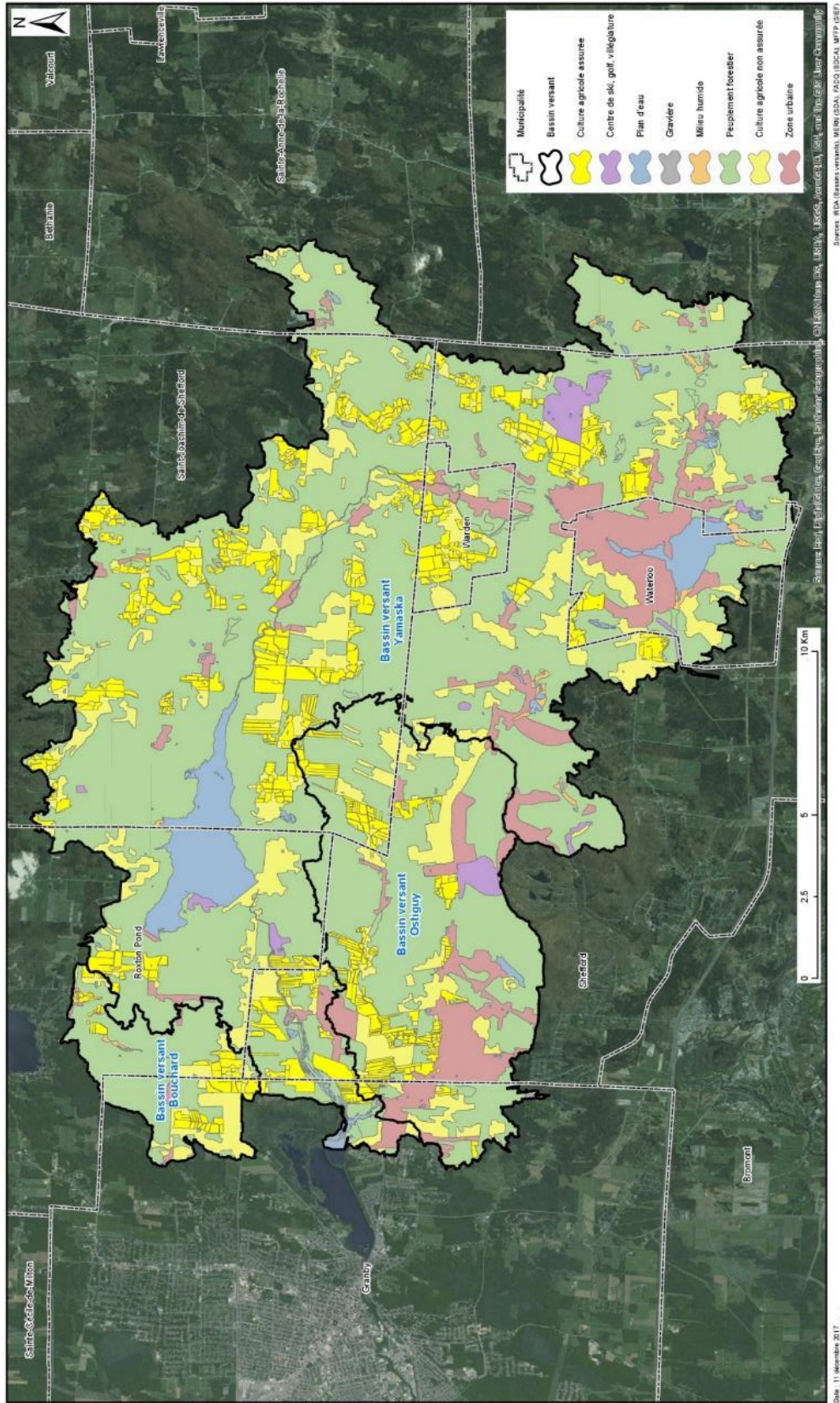


Figure 3. Utilisation du territoire des trois bassins versants à l'étude.

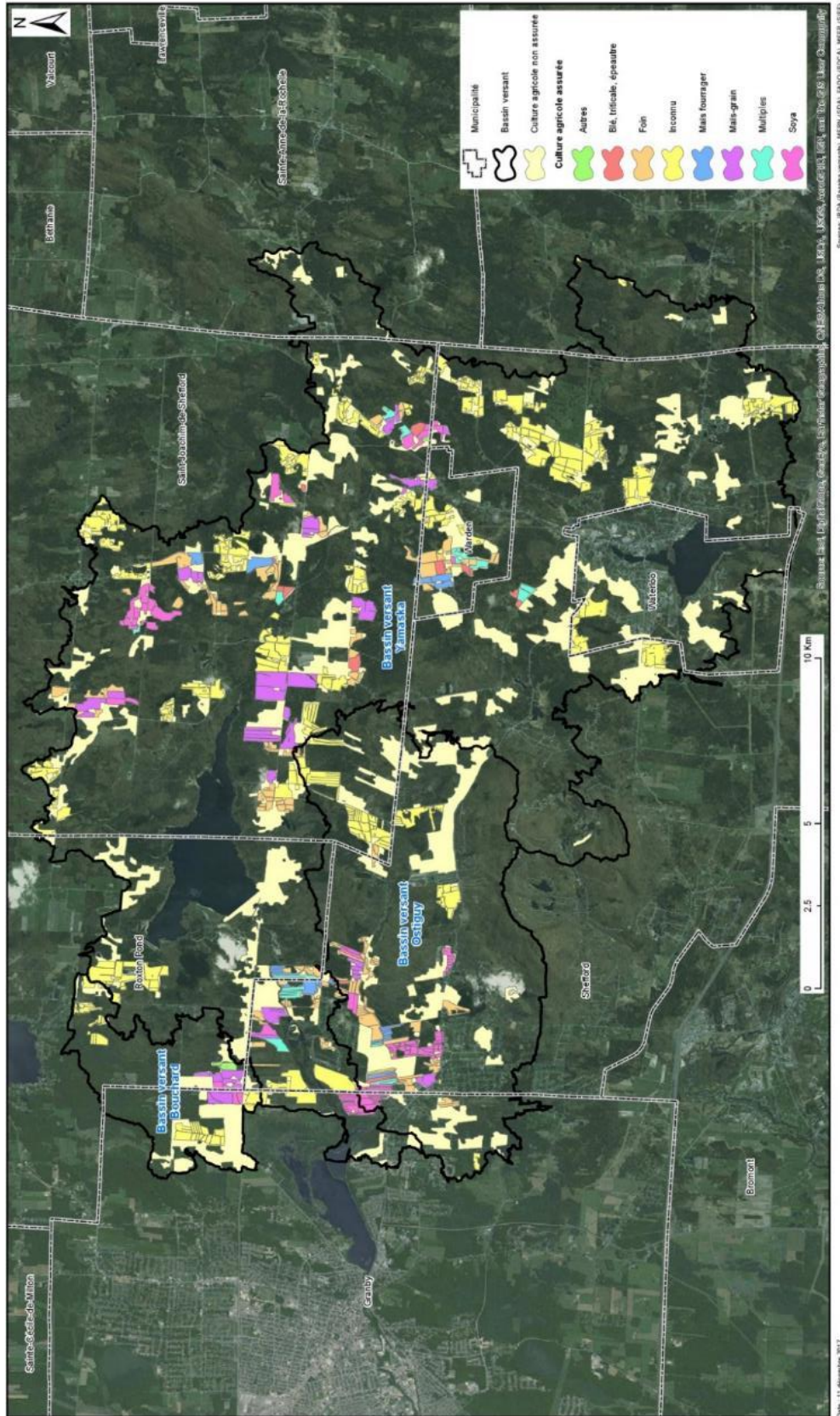


Figure 4. Répartition des cultures assurées de l'ensemble des bassins étudiés (BDCA, 2017).

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 sont composées de plusieurs instruments localisés aux abords et dans le cours d'eau (Tableau 5). 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 5. Détail des équipements par site.

Équipements de mesure	Station Yamaska Nord	Station Ostiguy	Station Bouchard
Sonde multi-paramètres (YSI) (turbidité, conductivité électrique et température)	x	x	x
Sonde barométrique (HOBO) (hauteur de la colonne d'eau)		x	
Sondes barométrique 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 5).



Figure 5. Installation des équipements à la station Bouchard.

Les sondes multi-paramètres ont été retirées du cours d'eau avant la mise en place du couvert de glace (8 décembre 2016) et réinstallées à la fin de l'hiver (28 mars 2017). En période hivernale, l'équipe terrain brise la glace afin de procéder aux jaugeages et échantillonnages ponctuels (Figure 6).



Figure 6. 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 (Figure 8). Un moulinet à godet ou hydrométrique (Figure 7) a été utilisé pour les mesures, à raison d'un minimum de 15 mesures par section d'écoulement suivant un espacement régulier, permettant de couvrir la section d'écoulement d'une berge à l'autre. Au cours de la période d'étude, une vingtaine 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 coordonné par l'équipe de la Direction des Expertises Hydriques du MDDELCC (No. 030343; 0,1 km en aval du barrage du Lac Waterloo).

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 était prélevé et ramené 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 Direction des Expertises Hydriques du MDDELCC. Deux autres campagnes étaient réalisées dans les 36 heures suivant ce même pic, séparées minimalement par quatre heures entre chacune d'elles. 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 165 échantillons a été dosé pour l'analyse physico-chimique dans les laboratoires de l'IRDA. La figure 9 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 7. Mesures du débit instantané 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 (figure 8). Au total, 14 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, un tel dispositif de suivi amont-aval est adapté à la détection éventuelle d'une réponse de la qualité de l'eau à des actions environnementales entreprises dans le bassin versant. Les observations 2016-2017 pourront ainsi servir de balise précise permettant de quantifier

le changement dans les charges de sédiments et de nutriments mesurées en suivant le même protocole.

Lors des campagnes, les échantillons ont été prélevés dans des bouteilles de 500 ml spécialement identifiées, qui étaient ensuite conservées au froid. Par mesure de sécurité et pour éviter de mettre les sédiments en circulation, une perche télescopique ou un poids lesté a été utilisé plutôt que de descendre dans le cours d'eau. La bouteille est rincée une première fois avec l'eau de surface, puis est plongée au centre de la colonne d'eau pour prendre l'échantillon final. Des photos amont/aval sont également prises de manière à documenter l'état des berges et de l'écoulement pour chaque échantillon.

Le dosage des échantillons d'eau au laboratoire a été réalisé au laboratoire de Physico-chimie de l'IRDA afin de déterminer les concentrations de matières en suspension (MES), azote ammoniacal (N-NH₄), nitrates (N-NO₃), 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, totales dissoutes et totales réactives solubles, principalement sous forme d'ortho-phosphates (Murphy et Riley, 1962; Greenberg et al., 1992c; Sharpley et al., 1991). Cette spéciation des formes de phosphore permet 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.

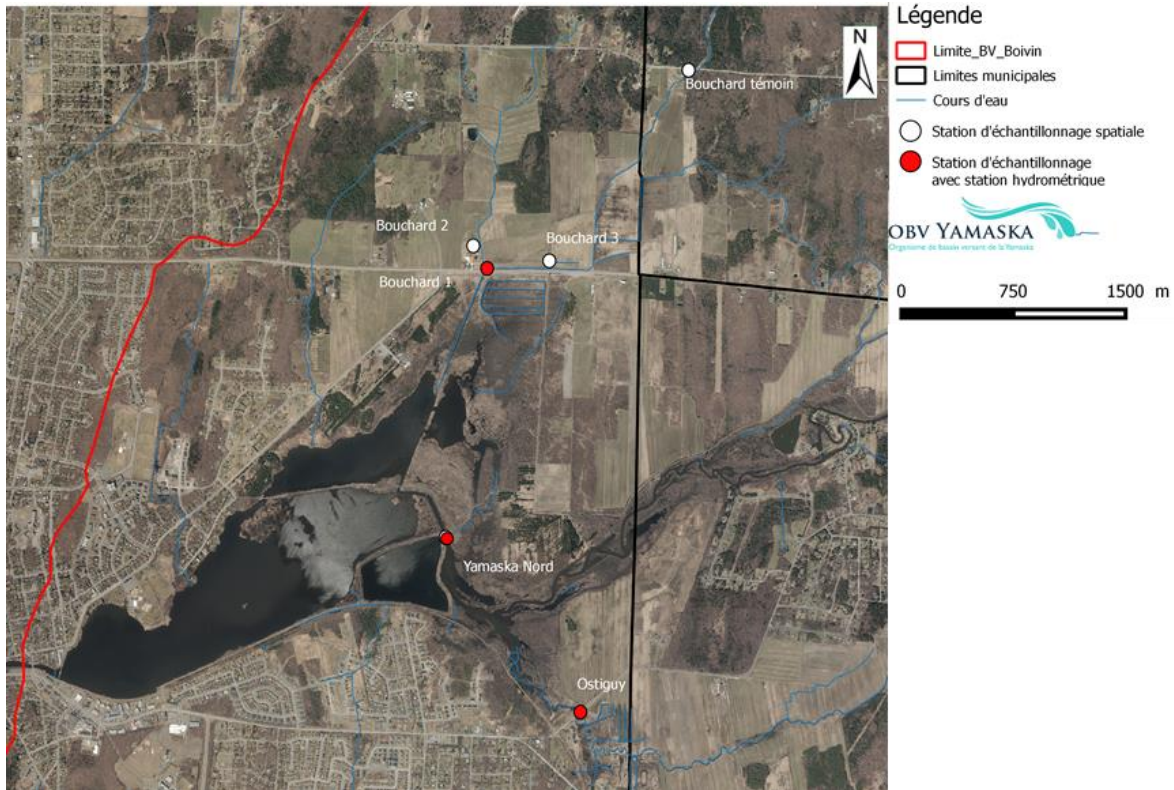


Figure 8. Stations d'échantillonnages, 2016-2017.

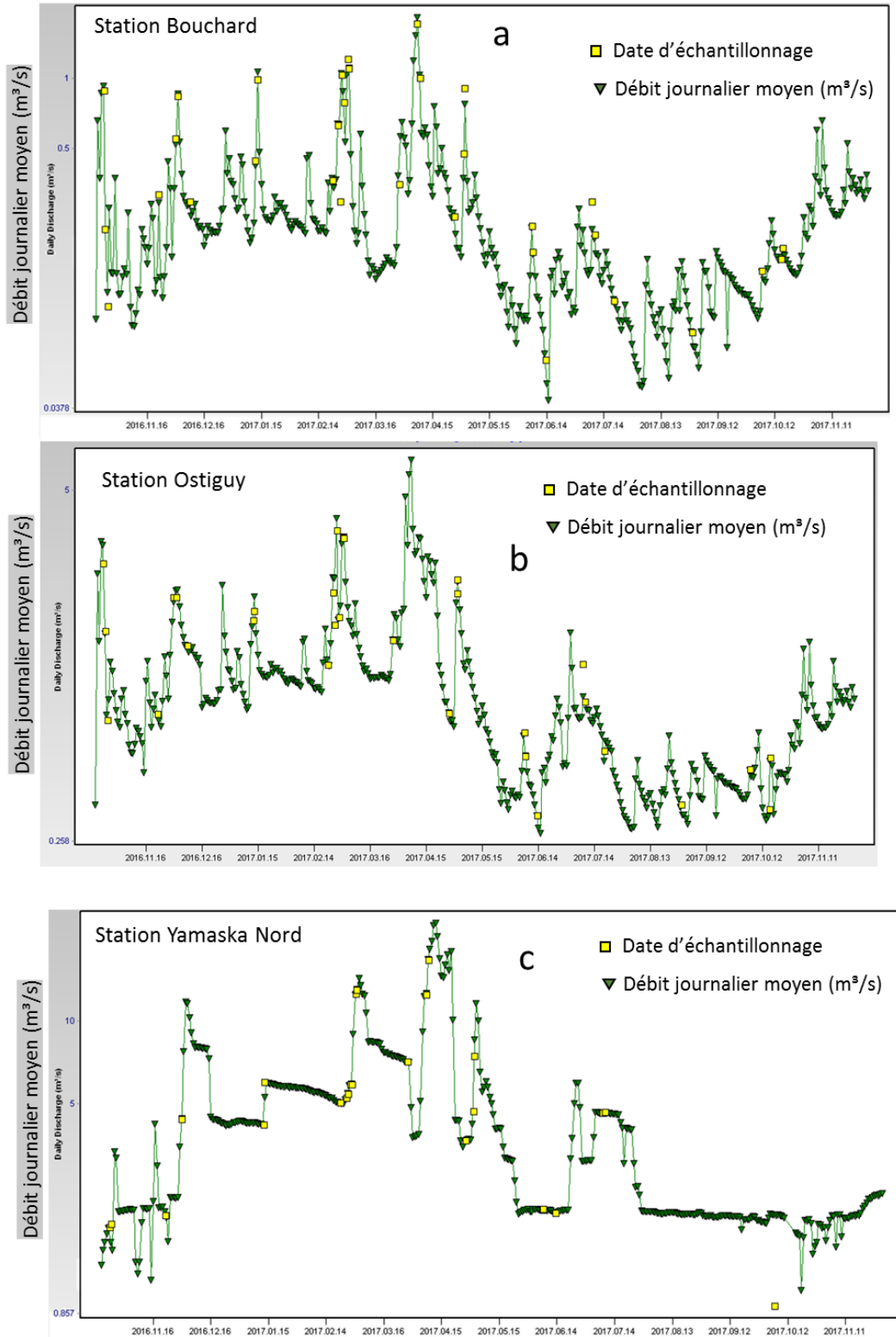


Figure 9. Distribution dans le temps des débits journaliers moyens et des débits observés au moment des échantillonnages aux stations Bouchar (a), Ostiguy (b) et Yamaska Nord (c).

3.2.4 Dépouillement des données hydrométriques

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 souterrains;
- 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 l'année d'octobre 2016 à novembre 2017. 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 de 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 » (μS/cm);

C_{min} = Conductivité de référence du ruissellement de surface (μS/cm);

CB_i = Conductivité de l'écoulement de base au temps « i » (μS/cm).

La Figure 10 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 la station Yamaska Nord traduit vraisemblablement un phénomène de sédimentation, associé à la retenue des eaux plus en amont.

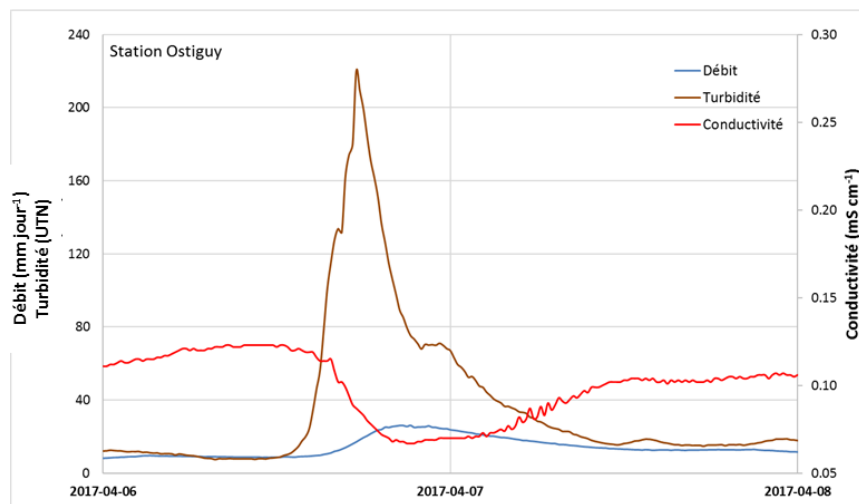
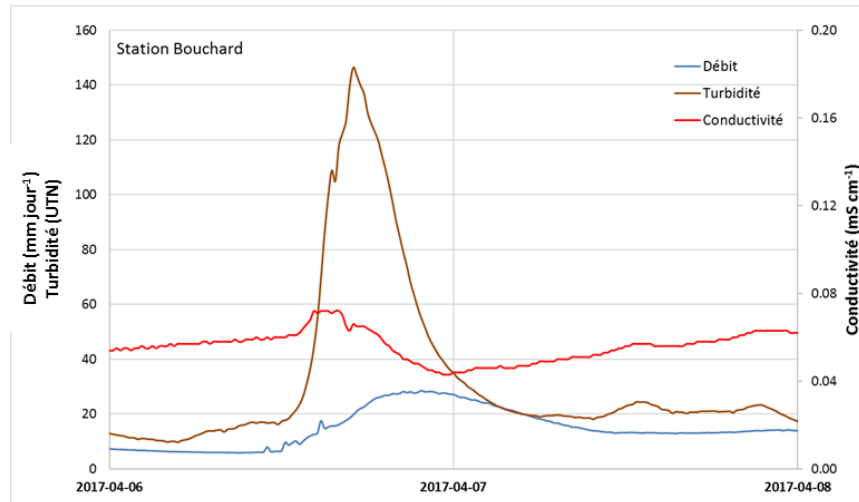
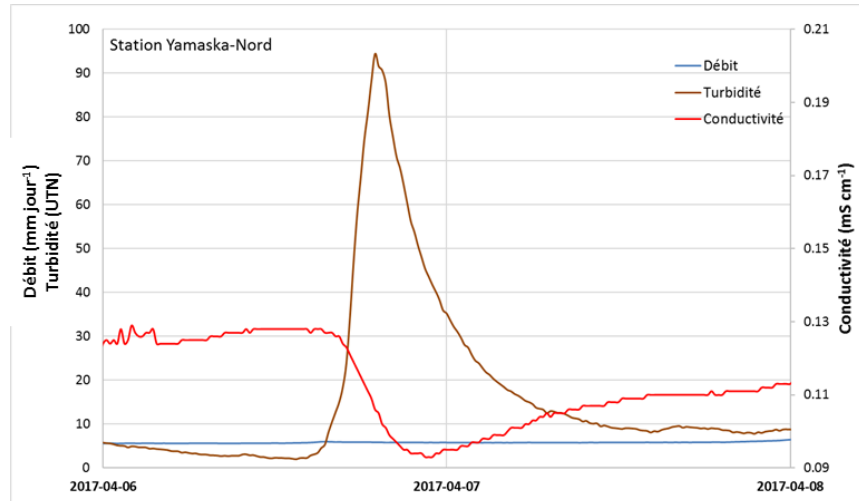


Figure 10. Variation du débit, de la turbidité et de la conductivité au pas de temps de 15 minutes pour la crue du 7 avril 2017 observée aux trois stations hydrométriques.

La Figure 11 illustre les précipitations totales et débits journaliers observés aux stations des cours d'eau Bouchard, Ostiguy et Yamaska Nord pour la période d'étude, d'une durée de 407 jours, soit d'octobre 2016 à novembre 2017. Dans l'ensemble, les hauteurs totales d'eau exportées se situent à 898 mm, 926 mm et 814 mm pour les bassins Bouchard, Ostiguy et Yamaska-Nord, respectivement. Une recharge soutenue de l'aquifère 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.

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 favorise l'émission du ruissellement. La comparaison des hydrogrammes des trois bassins illustre par ailleurs des amplitudes moindres des variations du débit sur la Yamaska-Nord, reflétant possiblement 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'écoulement de base. 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 en période d'écoulement de base.

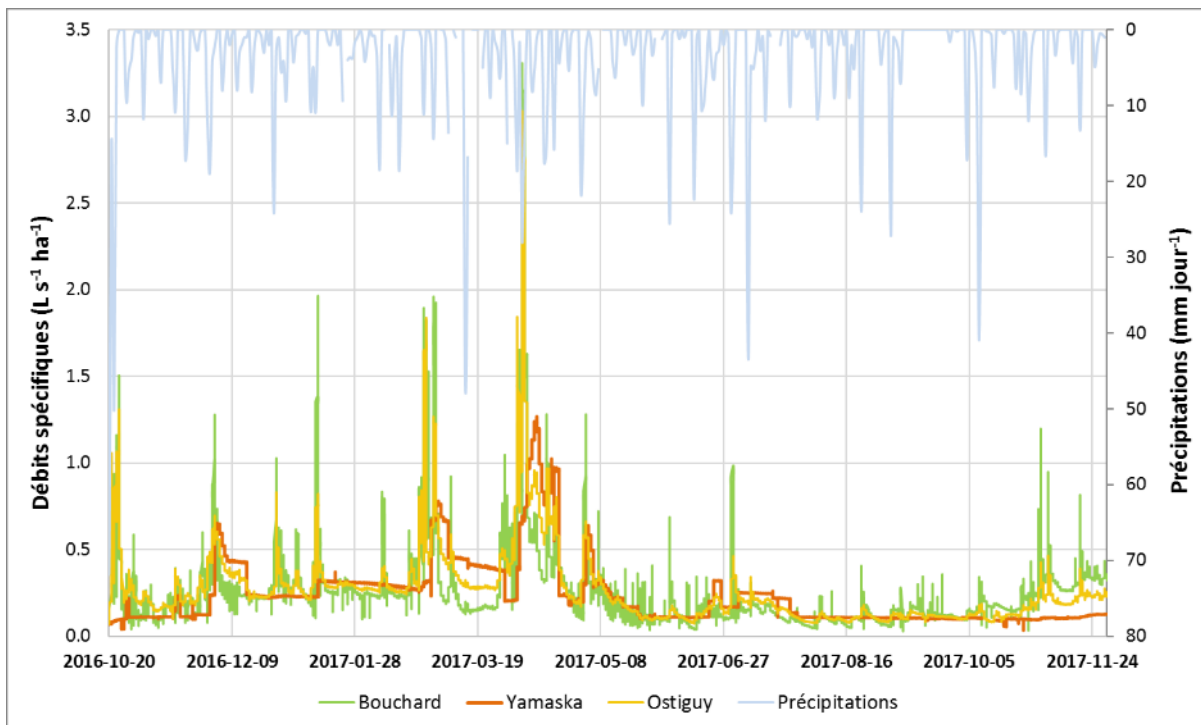


Figure 11. Séries chronologiques des débits spécifiques et des précipitations journalières observés aux trois stations pour la période 2016-2017.

La figure 12 illustre la séparation des écoulements de base et du ruissellement de surface du ruisseau Bouchard en 2017, telle que dérivée de l'analyse du signal de conductivité électrique. Globalement, les résultats démontrent un gradient saisonnier très contrasté entre le printemps, dominé par des écoulements rapides de surface, et les périodes estivales et automnales, dominées par des écoulements souterrains (drains agricoles et résurgence de l'aquifère non confinée). Au final, l'écoulement souterrain contribue néanmoins à la plus large part du débit annuel. Pour la période d'étude, la contribution du ruissellement de surface au ruisseau Bouchard est estimée à 270 mm, pour une hauteur d'eau totale de 482 mm. L'estimation des séparations des écoulements aux stations Ostiguy et Yamaska-Nord est moins concluante en raison des effets de refoulement du débit et n'est donc pas présentée. La cohérence dans la variabilité des signaux de conductivité et de turbidité observée aux trois stations suggère néanmoins que les séparations des hydrogrammes du ruisseau Bouchard sont représentatives des conditions et des processus hydrologiques à l'œuvre sur les terres des deux autres bassins versants.

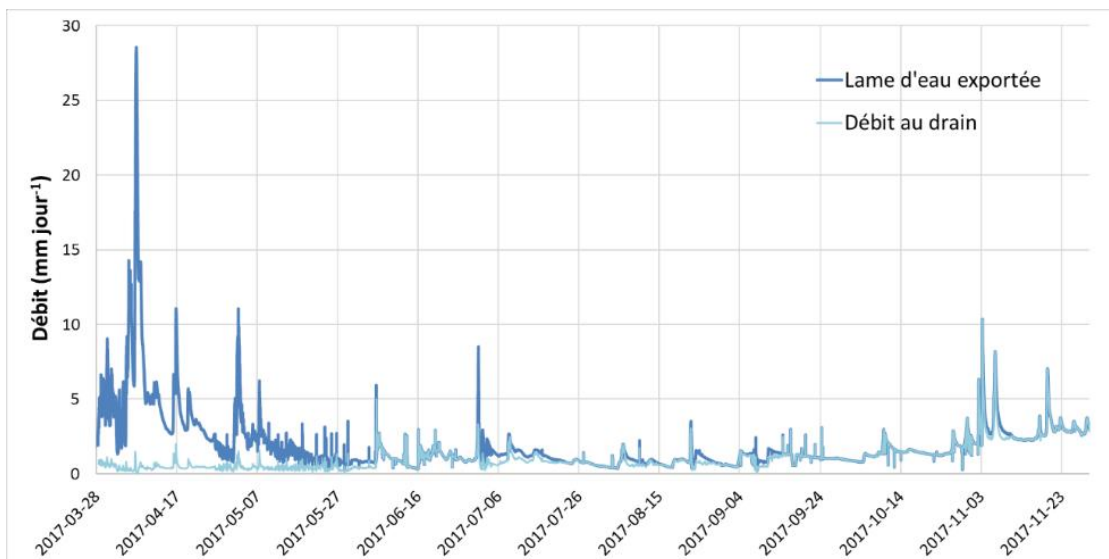


Figure 12. Séparation de l'écoulement de surface et souterrain pour le cours d'eau Bouchard.

3.2.4.2 Flux de sédiments et de nutriments aux stations hydrométriques

Aux trois stations hydrométriques, rappelons que le débit et les signaux géochimiques sont mesurés de façon continue et que la concentration en nutriments est plutôt mesurée de façon ponctuelle, au moyen de la prise et du dosage des échantillons d'eau au 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 et de nutriments (N, P et Ca) 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 13a, 13b et 13c illustrent la distribution des observations instantanées de concentrations en calcium (Ca), matières en suspension (MES), 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 gradients principaux interagissent dans l'expression de cette variabilité, soit les conditions hydrologiques à l'œuvre lors du prélèvement d'échantillons (débit, répartition surface/souterraine, monté 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 13a, 13b et 13c illustrent les influences respectives de ces deux gradients sur les concentrations de nutriments et de sédiments dans les cours d'eau, soit par une représentation en fonction du débit instantané des cours d'eau (influence des conditions hydrologiques) et en fonction la date de l'année (effet de saisonnalité).

Les figures 14a, 14b et 14c 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 novembre 2017 (407 jours). Les tableaux 6 et 7 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, de façon à mettre en relief les différences entre les charges estimées pour chaque bassin et leurs distributions en fonction des débits des cours d'eau et la période de l'année.

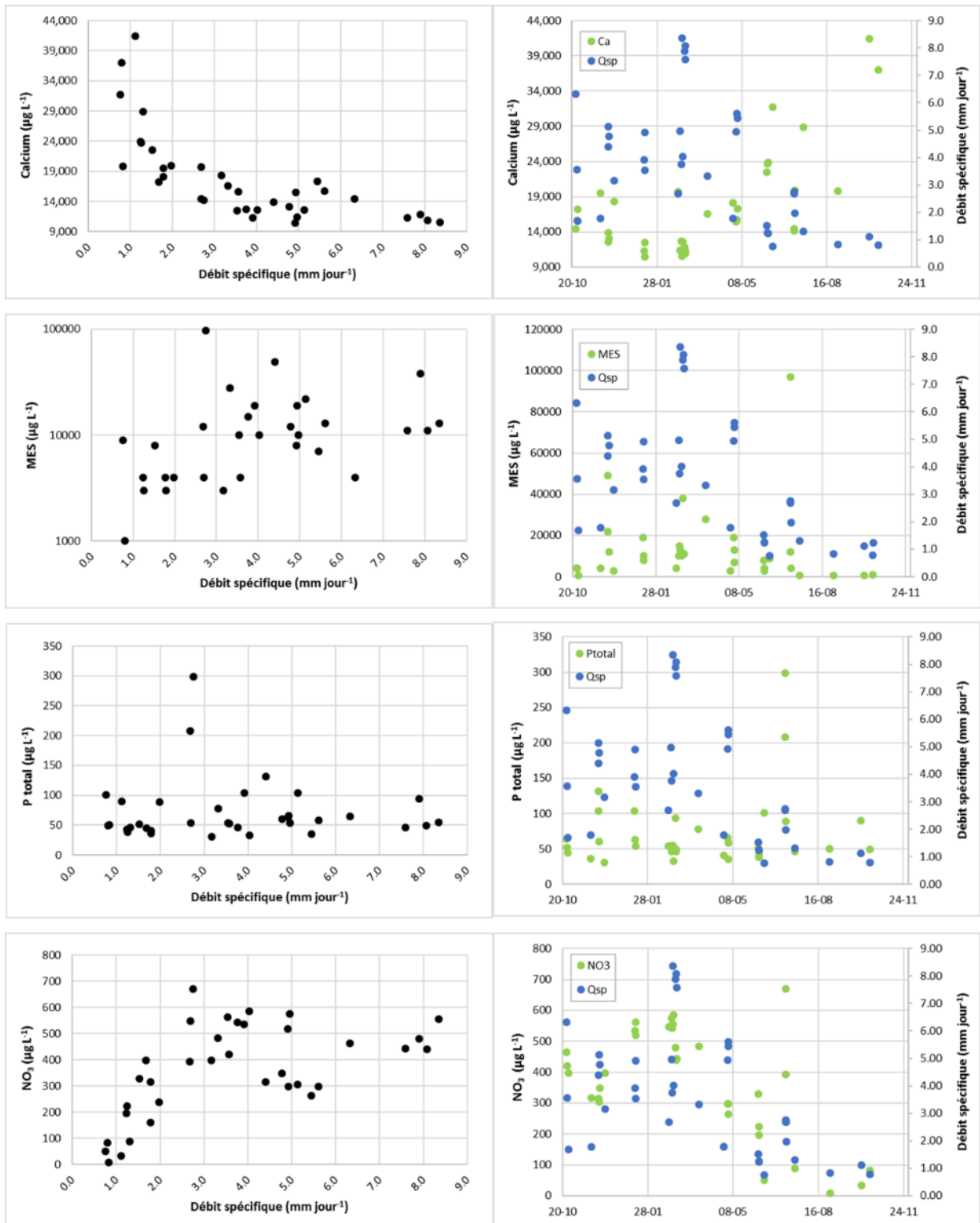


Figure 13a. Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO₃) en fonction du débit spécifique et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique du ruisseau Bouchard.

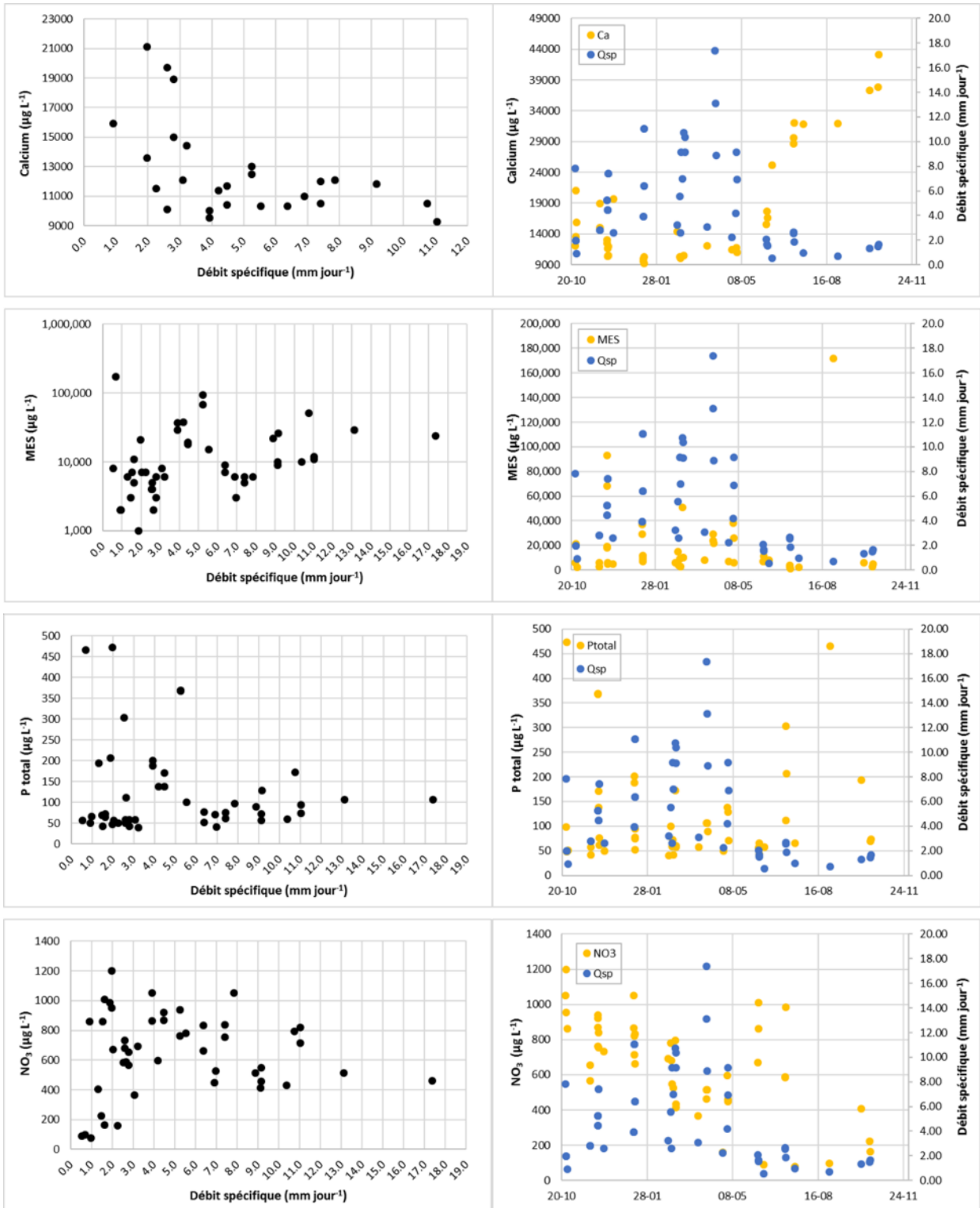


Figure 13b. Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO₃) en fonction du débit spécifique et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique du ruisseau Ostiguy.

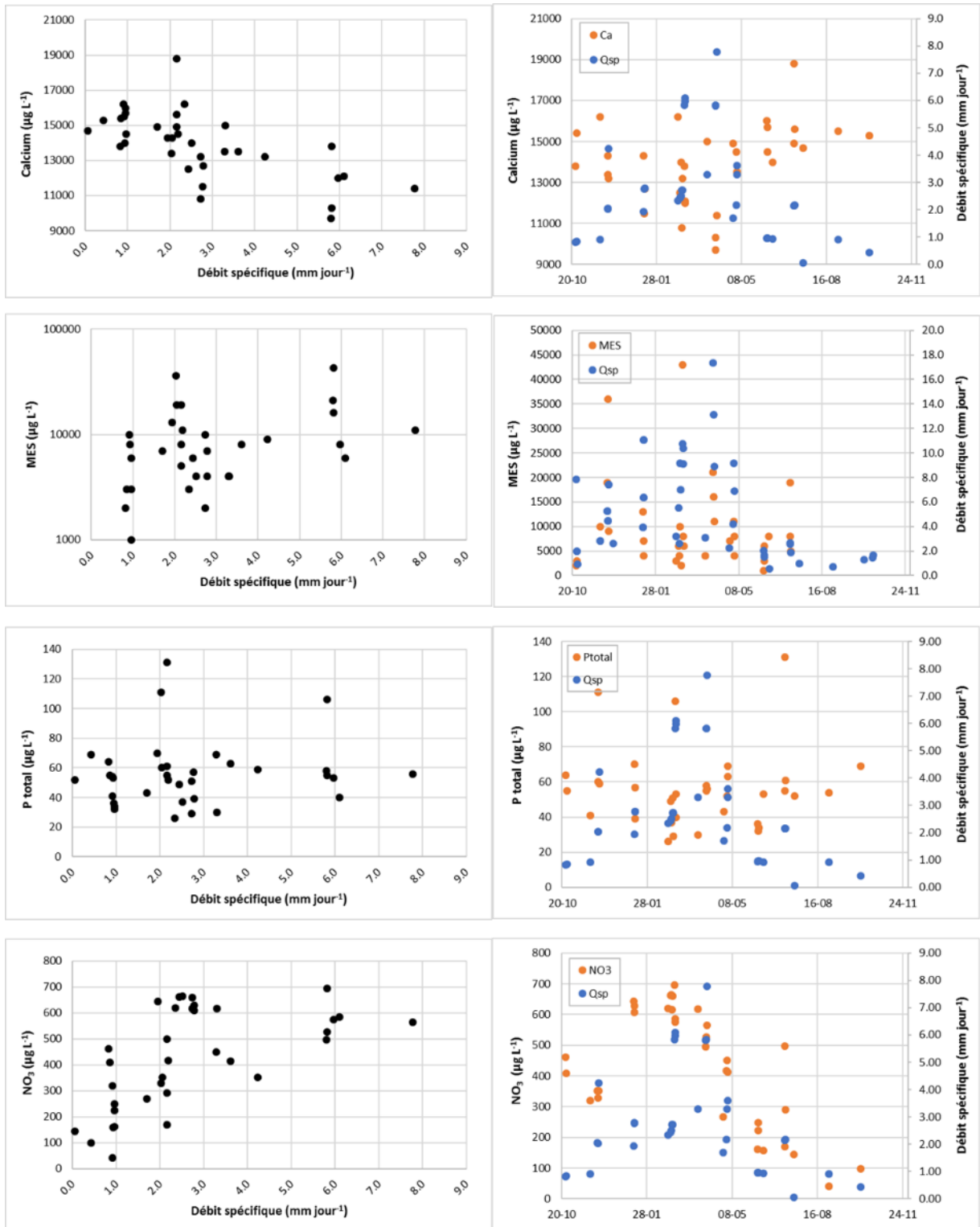


Figure 13c. Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO₃) en fonction du débit spécifique et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique de la rivière Yamaska Nord.

Calcium

La distribution des concentrations en calcium (Ca) aux trois stations hydrométriques est fortement influencée par le débit, tel qu'illustré aux figures 13a, 13b et 13c. 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 observations les plus basses de concentration en Ca témoignent à l'inverse du phénomène de dilution résultant de l'apport de ruissellement de surface. Ce même gradient supporte la séparation des écoulements sur la base du signal de conductivité décrit précédemment. Le point d'inflexion de la relation de la concentration en Ca et le débit du cours d'eau reflète les conditions hydrologiques où le ruissellement constitue une part significative 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. En exprimant l'initiation du processus de ruissellement de surface, il traduit par le fait même l'activation des processus de transfert diffus de sédiments et de phosphore. Ceux-ci sont en effet largement tributaires du cheminement rapide et en surface des eaux dans le bassin versant.

Les observations colligées au ruisseau Bouchard sont particulièrement bien structurées en fonction du débit (figure 13a). Cette nette distribution reflète le fait que le cours d'eau est relativement peu influencé par le refoulement de son écoulement en aval, ou l'influence de retenues d'eau en amont. En étiage, alors que le débit du ruisseau est au plus bas, la concentration en Ca est maximale, témoignant d'apports exclusivement souterrains, reflétant la qualité de la nappe d'eau superficielle qui rejaillit au cours d'eau. Dans le cas du ruisseau Bouchard, les concentrations élevées observées en été et en automne expriment aussi un effet de la saisonnalité sur la richesse des écoulements en lien avec l'assèchement graduel des sols en cours de saison. Le même phénomène est aussi bien illustré par le signal de la conductivité électrique de l'écoulement de base du cours d'eau, qui augmente au fil de la saison estivale. Pour le ruisseau Bouchard, ce débit limite est estimé à environ 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 débits limites sont utilisés dans la modélisation des flux de nutriments aux trois stations hydrométriques et rapportés ci-après.

Tableau 6. Charges annuelles spécifiques (365 jrs, base ha) de calcium, de matières en suspension, d'azote et de phosphore estimées pour les trois bassins versants à l'étude.

	Yamaska-Nord		Bouchard		Ostiguy	
	Conc. (ug/L)	Charge (kg/ha-an)	Conc. (ug/L)	Charge (kg/ha-an)	Conc. (ug/L)	Charge (kg/ha-an)
Ca	13710	100	18411	148	18422	153
MES	7989	58	13821	111	9876	82
P total	55,8	0,41	113,4	0,91	63,2	0,52
P biodisponible	34,1	0,25	78,1	0,63	40,1	0,33
P dissous	21,9	0,16	57,8	0,47	28,4	0,24
P ortho	16,3	0,12	46,6	0,38	22,5	0,19
NO₃	473,0	3,45	637,3	5,13	426,3	3,54
NH₄	87,4	0,64	162,0	1,31	73,4	0,61
P particulaire	33,9	0,25	55,7	0,45	34,9	0,29
P particulaire biodisponible	12,2	0,09	20,3	0,16	11,7	0,10
P particulaire non biodisponible	21,7	0,16	35,3	0,28	23,1	0,19
P organique dissous	5,6	0,04	11,1	0,09	5,9	0,05

Tableau 7. Spéciation des formes de phosphore estimée pour les charges des trois bassins versants à l'étude.

	Yamaska-Nord	Bouchard	Ostiguy
P particulaire / P total (%)	60,7	49,1	55,1
P dissous / P total (%)	39,3	50,9	44,9
P biodisponible / P total (%)	61,2	68,8	63,4
P ortho /P total (%)	29,3	41,1	35,6
P biodisponible / P particulaire (%)	36,0	36,5	33,6
Richesse P_{sed} (ug/g)	6979	8205	6401

Sédiments

La concentration instantanée de l'eau en matières en suspension est aussi fortement influencée par le débit du cours d'eau. En règle générale, la concentration augmente fortement en fonction du débit, au-delà du débit limite du cours d'eau. Cette forte augmentation traduit la force érosive du ruissellement de surface à l'œuvre dans le bassin versant et la capacité de transport des sédiments élevée 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. Aussi, la superficie plus faible du bassin versant du ruisseau Bouchard fait en sorte que le phénomène d'hystérésis s'y exprime plus fortement, tel qu'en fait foi la comparaison des patrons de distributions en MES aux trois stations (figures 14a, 14 b et 14c). L'influence de refoulements sur la Yamaska Nord et l'Ostiguy a aussi pour conséquence de niveler en partie le phénomène d'hystérésis pour ces stations. Il en résulte une relation linéaire mieux ajustée entre la concentration en MES et le débit de ces deux cours d'eau.

Les figures 14a, 14b et 14c illustrent la distribution dans le temps des flux de sédiments (MES) aux trois stations hydrométriques. Dans l'ensemble, la période de fonte du couvert hivernal, doublée de précipitations liquides en mars et avril contribue à la plus large part des exportations annuelles. Les redoux hivernaux de 2017 de même que les précipitations tardives automnales de 2016 contribuent également de façon significative aux charges de sédiments annuelles. La période estivale, malgré des précipitations plus abondantes que la normale, ne contribue que de façon marginale au bilan des exportations. Enfin, la station du ruisseau Bouchard est associée à une exportation relativement plus importante de sédiments au cours de la période de recharge en novembre que les deux autres bassins versants.

Au final, le tableau 6 rapporte les charges annuelles spécifiques de MES des trois bassins versants. Celles-ci sont de l'ordre de 111, 82 et 58 kg MES/ha-an, respectivement pour les bassins Bouchard, Ostiguy et Yamaska Nord. Ces taux demeurent relativement bas comparés aux taux d'exportation mesurés dans d'autres micro-bassins versants de la Montérégie à vocation agricole (Michaud 2005, 2009, 2012). La prédominance de l'occupation forestière du territoire et l'importance des superficies en fourrages pérennes sur le territoire en culture explique 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 traduit manifestement une activité érosive relativement plus importante dans ce bassin versant. La superficie beaucoup plus faible du bassin, et le fait que l'écoulement y est apparemment moins influencé par le refoulement des eaux, favorise également la capacité de transport des sédiments, depuis les zones d'émission jusqu'à la station hydrométrique.

La charge spécifique de sédiments du bassin Ostiguy (82 kg MES/ha-an) demeure pour sa part inférieure à celle du Bouchard (111 kg MES/ha-an), et ce malgré un relief plus accidenté qui prédisposerait en principe à des taux d'érosion plus élevés. Les conditions propices à la sédimentation, observées à la station Ostiguy, influenceraient ainsi à la baisse le flux sédiments qui y a été estimé.

Enfin, le flux spécifique de sédiments observé à la station de la Yamaska Nord (58 kg MES/ha-an), qui se situe très 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.

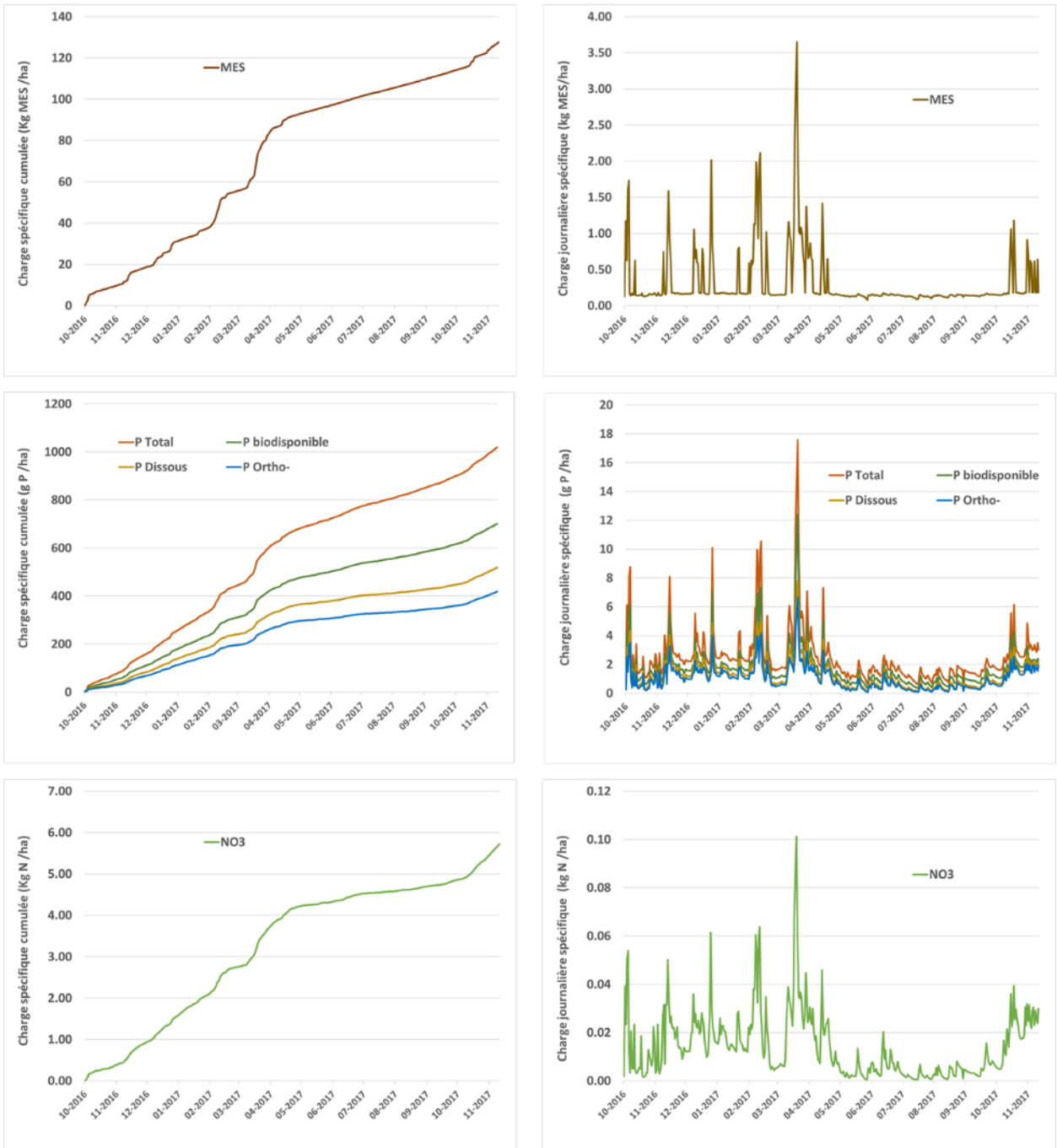


Figure 14a. Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, des différentes formes de phosphore et des nitrates à la station hydrométrique du ruisseau Bouchard.

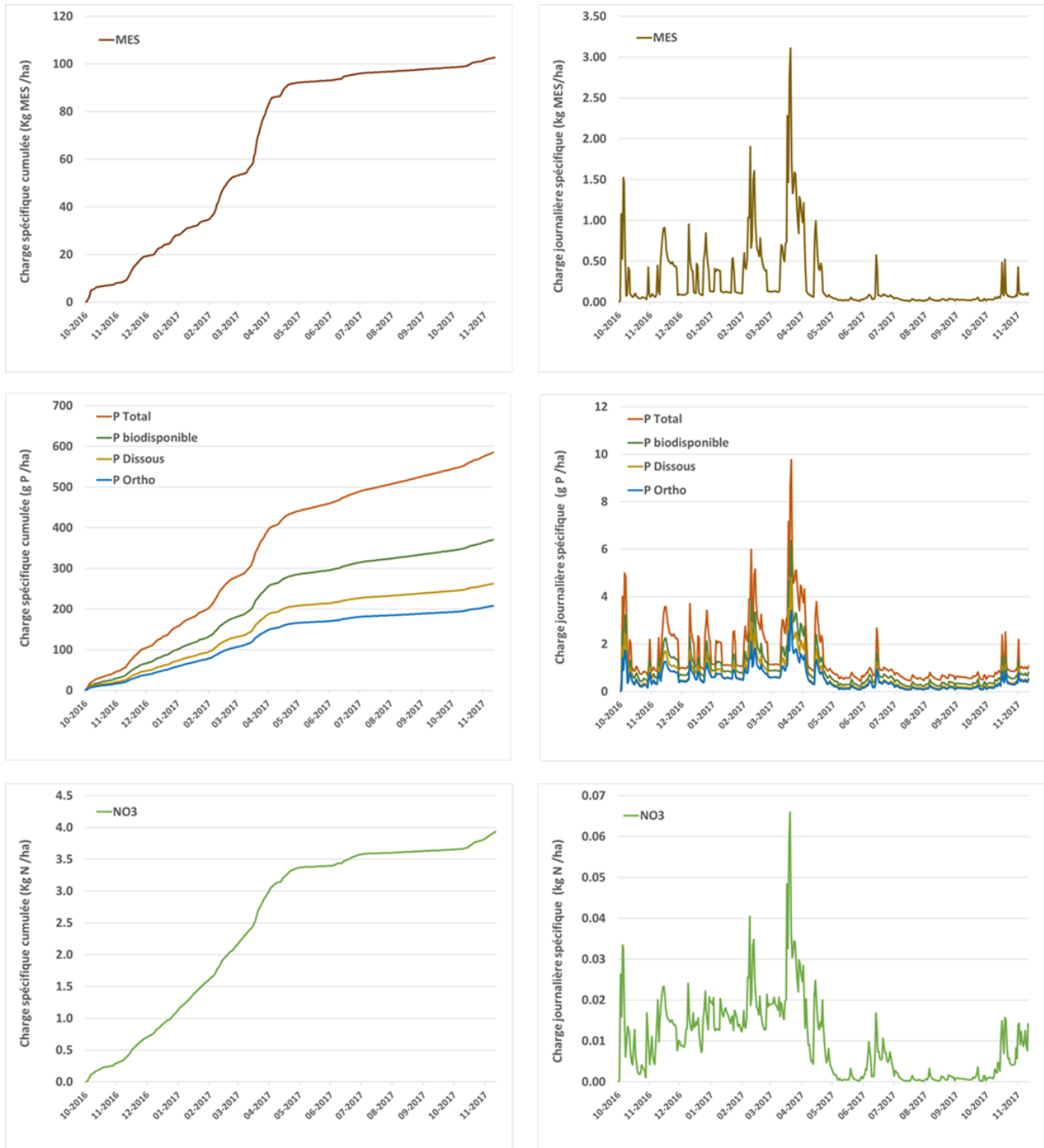


Figure 14b. Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, des différentes formes de phosphore et des nitrates à la station hydrométrique du ruisseau Ostiguy.

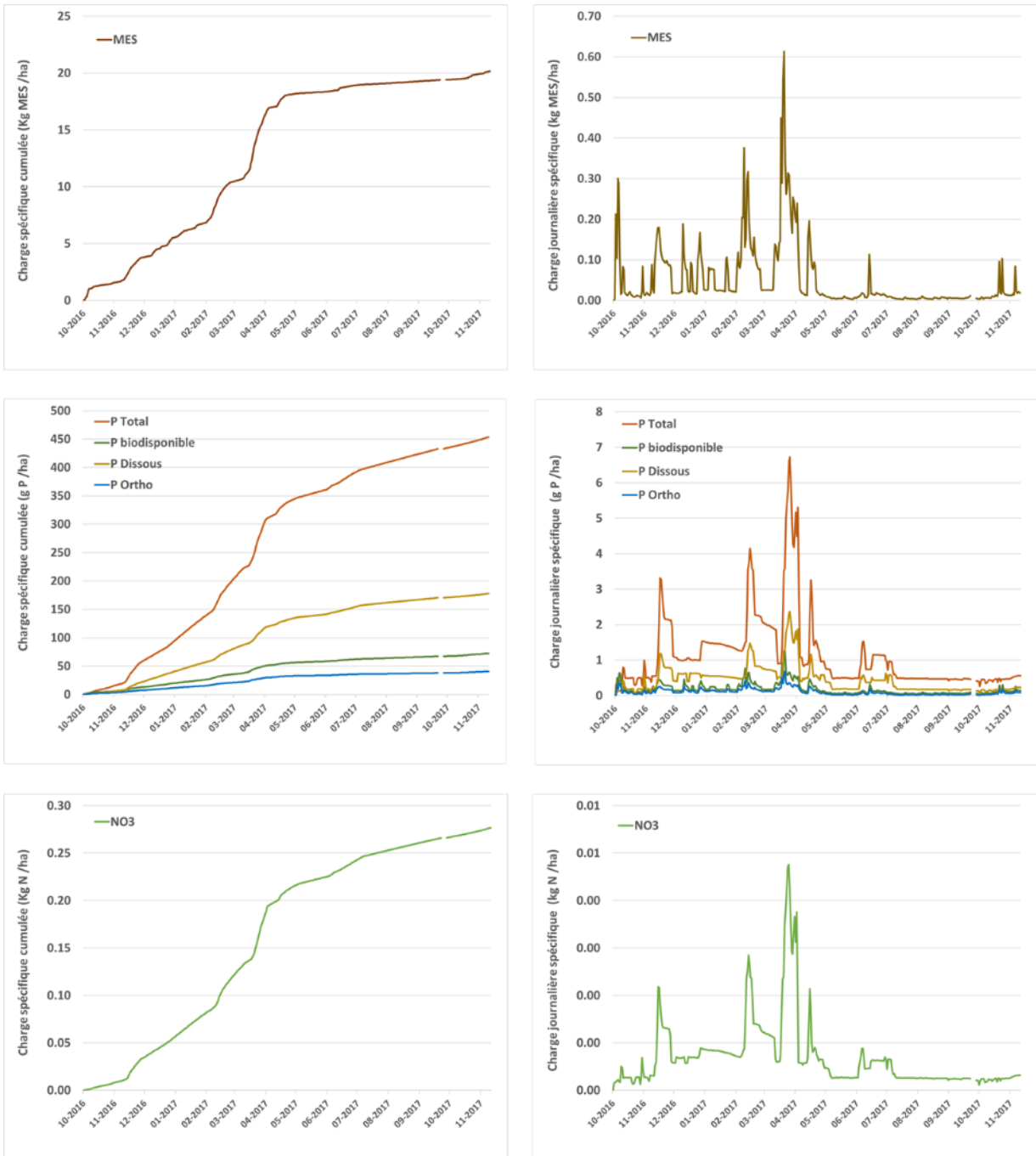


Figure 14c. Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, des différentes formes de phosphore et des nitrates à la station hydrométrique de la rivière Yamaska Nord.

Phosphore

Globalement, le flux spécifique annuel de phosphore total estimé à la station du ruisseau Bouchard (0,9 kg P/ha-an) est près du double de celui estimé pour les deux autres stations à l'étude, soit de 0,4 et 0,5 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 4), de même qu'une proportion relativement plus importante de cultures annuelles dans les systèmes de culture expliqueraient cette vulnérabilité plus élevée aux exportations de P. Si le bassin versant se distingue à la hausse quant aux quantités de P exportées, il se distingue aussi nettement 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 15; Tableau 7). En fait, plus de la moitié (50,9%) du P exporté à l'exutoire du bassin Bouchard est sous forme dissoute, contre 39 à 45% pour les bassins Yamaska Nord et Ostiguy. 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 Ptotal 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. La biodisponibilité du P plus élevée des eaux du ruisseau Bouchard s'ajoute ainsi à la problématique de charges totales de P déjà plus élevées provenant de son bassin versant.

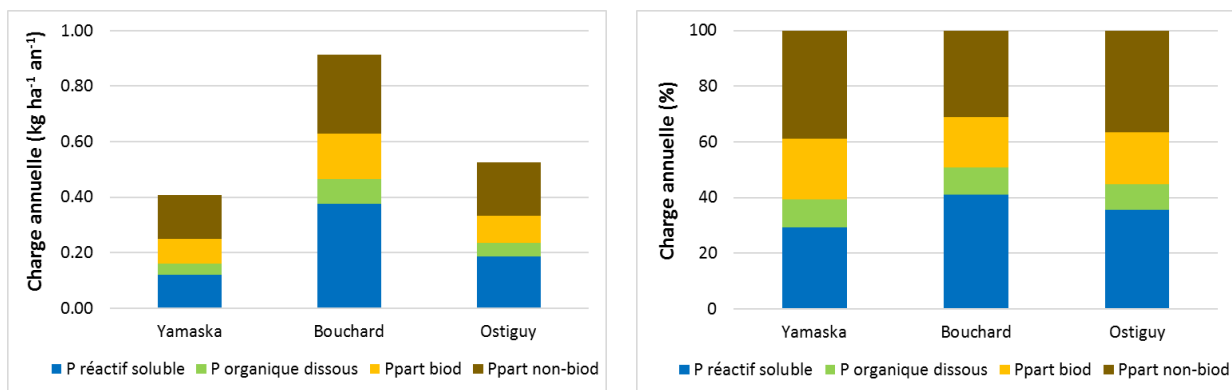


Figure 15. Charges et spéciation des formes de phosphore observées aux exutoires des trois bassins versants à l'étude.

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 calculs, il s'avère que la richesse moyenne en P des sédiments provenant du bassin Bouchard (7985

ug/g) est beaucoup plus élevée que celle observée aux stations Ostiguy (5692 ug/g) et Yamaska Nord (5084 ug/g). Les indices de biodisponibilité du P particulaire (ratio P Biodisponible/P total) demeurent cependant dans le même ordre de grandeur, soit de 34 à 36%. En bref, c'est donc l'enrichissement de l'eau du ruisseau Bouchard en phosphore dissous et réactif, de même que l'enrichissement de ses sédiments en P, qui contribuent à expliquer la charge totale de P près de deux fois plus importante qu'aux bassins Ostiguy et Yamaska Nord. Dans la mesure où les charges de sédiments observées n'expliquent pas le gradient dans les charges de P, les processus d'érosion ne seraient pas le facteur prédominant dans l'explication des exportations de P plus élevées au bassin Bouchard. L'explication y tiendrait plutôt aux apports de P relativement plus élevés par unité de surface, et dans l'enrichissement relativement plus important des sols en P qui en découle.

Nitrates

Les charges annuelles spécifiques de nitrates ont été estimées à 3,5 kg N/ha aux bassins Ostiguy et Yamaska Nord, contre 5,1 kg N/ha-an au bassin Bouchard. Les concentrations observées, de l'ordre de 426 à 637 ug N/L en moyenne annuelle pondérée pour le débit, se situent bien en deçà des niveaux rapportés pour d'autres bassins de la Montérégie présentant des occupations agricoles relativement plus importantes et intensives. La dominance de l'occupation forestière des territoires des trois bassins versants à l'étude contribuerait ainsi à la génération de flux de nitrates relativement peu élevés. Il est cependant noté que les taux de nitrates se maintiennent en période hivernale dans les trois bassins à l'étude. 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. Une interprétation plausible au maintien des concentrations en période hivernale tiendrait au stock d'azote disponible en fin de saison de croissance des cultures. Ces reliquats de fertilisation azotée seraient mobilisés graduellement en période de recharge de la nappe durant de l'hiver au printemps. Une implication pratique de cette observation est l'intérêt de valoriser à son plein potentiel la valeur fertilisante des engrais de ferme et minéraux appliqués sur les terres agricoles.

3.2.4.3 Gradients de qualité de l'eau estimés de l'échantillonnage spatial

Les concentrations moyennes en matières en suspension, en nitrates et en différentes formes de phosphore des eaux du ruisseau Bouchard, telles qu'observées lors des 16 campagnes d'échantillonnage spatial des quatre stations du ruisseau, sont présentées au tableau 8. Rappelons que la station no. 1, localisée à l'exutoire du bassin versant, correspond à la station hydrométrique principale, dont les résultats du suivi hydrologique ont été présentés antérieurement. La station Témoin est localisée à l'amont du bassin versant et témoigne d'une occupation principalement forestière du territoire. Les stations d'échantillonnage 2 et 3 sont pour leur part représentatives des sous-bassins de

la branche Ouest et Est du ruisseau, et cumulent la majeure partie de l'occupation agricole du bassin versant (figure 8).

Dans l'ensemble, les distributions dans les concentrations des différents paramètres de qualité de l'eau témoignent d'un contraste marqué entre les observations colligées à la station Témoin, d'une part, et les trois stations localisées sur le cours inférieur du ruisseau. Ce contraste témoigne essentiellement des différences dans l'occupation du territoire.

De façon similaire aux gradients observés aux trois stations hydrométriques principales, les concentrations en calcium sont significativement et négativement corrélées avec le débit du ruisseau (station no.1). Les concentrations observées aux stations 1, 2 et 3, cependant, ne diffèrent pas significativement entre elles ($p > 0.05$), et demeurent résolument supérieures ($P < 0,05$) à la station Témoin en amont. Le chaulage et le drainage des terres expliquent vraisemblablement ce net gradient à la hausse observée pour les secteurs du bassin influencés par l'activité agricole.

L'analyse de la variabilité dans les concentrations en matières en suspension indique que ces dernières ne sont significativement pas influencées par le débit du cours d'eau. En fait, aucune différence significative n'est observée entre les quatre stations d'échantillonnage spatial des crues du ruisseau. Ce résultat surprend, compte tenu du contraste dans les occupations du territoire des différents sous-bassins. 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 de la forte variabilité temporelle des concentrations en MES attribuable 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 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 (figure 10).

L'analyse de la variance des concentrations observées en phosphore total aux quatre stations d'échantillonnage témoigne d'une concentration moyenne significativement inférieure au bassin Témoin amont (40 ug P/L) qu'aux trois autres stations (95 à 116 ug P/L). Bien que ce gradient témoigne d'un enrichissement significatif de l'eau de surface en phosphore en secteur agricole, retenons que les concentrations observées aux stations 1, 2 et 3 lors des crues du ruisseau Bouchard demeurent relativement modestes par rapport aux concentrations observées en P total dans le cadre d'autres dispositifs de mesure en Montérégie. Pour les bassins à vocation exclusivement agricole de la rivière Aux Brochets par exemple, les concentrations se situent plutôt entre 137 et 532 ug P/L, en moyennes pondérées pour le débit (Michaud et al., 2005, 2009a, 2009b; Madramootoo et al., 2012).

Si les concentrations en P total des stations 1, 2 et 3 ne diffèrent pas significativement entre elles, il en est autrement des différentes formes de phosphore.

L'absence de gradient significatif dans les taux de MES suggère par ailleurs que la dynamique d'érosion et de transfert de sédiments à la rivière n'est pas le facteur déterminant des charges réactives de P dans le bassin versant du ruisseau Bouchard. Ce constat reflète le gradient similaire, rapporté antérieurement, entre les stations hydrométriques principales Yamaska Nord, Ostiguy et Bouchard.

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 429 à 505 ug N/L. Ces teneurs témoignent cependant d'un enrichissement significatif ($p < 0,05$) par rapport à la station Témoin (106 ug N/L). Tel que rapporté antérieurement pour la station principale (no.1), 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. En bref, l'échantillonnage spatial du bassin Bouchard confirme les observations de la station hydrométrique sur le plan des flux de nitrates. Les taux observés ne sont pas très préoccupants au plan environnemental et ne reflètent pas, a priori, une problématique de surfertilisation azotée des cultures.

Tableau 8. Moyennes des concentrations 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.

Concentrations moyennes ajustées au modèle de variance							
Site	Ca	MES	P total	P Biod.	P Dissous	P Ortho-	NO3
Aval (1)	14 962 a	8 646 a	105.8 a	68.50 a	47.0 a,b	35.4 a	505 a
Br. Ouest (2)	17 923 a	3 437 a	111.5 a	90.22 a	76.1 a	64.8 b	534 a
Br. Est (3)	13 983 a	5 057 a	95.4 a	58.88 a	35.6 b	29.2 a	429 a
Témoin	7 755 b	2 866 a	40.3 b	21.20 b	6.7 c	5.1 c	106 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. La qualité dans l'ajustement des modèles sur une période d'une seule année 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 1,200 tonnes métriques par année, alors que la charge annuelle de phosphore total est de l'ordre de 8,5 tonnes métriques. Ces balises sont importantes, au plan stratégique, dans l'établissement éventuel de charges cibles de nutriments vers le lac et la planification d'actions environnementales permettant de rencontrer ces dernières.

L'ajustement dans les modèles de quantification des flux de sédiments et de nutriments, de même que le nombre élevé d'observations de qualité de l'eau colligées en période de crue des cours d'eau constituent par ailleurs d'excellentes balises dans la détection et la quantification éventuelle de réponses de la qualité de l'eau à des actions environnementales.

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 préoccupante, du fait de l'importance et de la nature soluble des charges de phosphore et le fait qu'il représente le principal affluent du territoire du CINLB de la Ville de Granby. La distribution des flux de sédiments des formes de P met en relief la pertinence d'actions d'accompagnement agroenvironnemental ciblées sur le contrôle de l'enrichissement des sols en phosphore et des modalités des apports d'engrais de ferme et minéraux.

4 VOLET II : 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 à une échelle plus fine, celui du territoire de la Ville de Granby. 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 (1m) et mis à la disposition des promoteurs du projet.

4.1 Objectifs

L'objectif principal du volet hydrologique de l'étude de caractérisation du bassin versant du Lac Boivin est d'appuyer les initiatives de mise en valeur du lac et du bassin en développant un outil permettant de représenter 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;
- Permettre l'évaluation des effets de différents scénarios d'occupation du territoire ou 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. 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 CRAAQ et du MAPAQ (Michaud et al., 2009). 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 région des cultures, afin de produire des estimations d'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, et qui ont été intégrés à un Système d'Information Géographique (SIG). Pour des détails sur le fonctionnement de GÉODEP et les équations de l'ODEP, le lecteur est invité à se référer aux manuels de l'utilisateur de ces deux outils (Drouin et al., 2014; Michaud et al., 2008).

Le système d'information à référence spatiale (SIG) réalisé et déposé 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 son utilisation;
- La cartographie des parcours de l'eau à haute résolution de l'ensemble du territoire 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 à un scénario de référence, représentatif des systèmes cultureux en place, tel que documenté sur la base des informations disponibles. À titre indicatif, les résultats d'un scénario de conservation des sols, intégrant un ensemble de pratiques culturelles et d'aménagement des terres antiérosif, de même qu'un scénario « Tout maïs » en régie conventionnelle sous labour, ont été évalués.

L'étude comprend également une carte d'indices de risque d'érosion des fossés de route et des cours d'eau. Cette évaluation est basée sur l'analyse des pentes de l'ensemble des fossés de routes et des cours d'eau du territoire du bassin versant du Lac Boivin, de même que sur l'érodabilité des sols traversés par ces cours d'eau. Cette évaluation est complétée par la représentation du numéro de courbe(CN) hydrologique à l'échelle de bassin versant. Cette information, générée à l'échelle des mêmes unités spatiales que l'application GÉODEP, est un intrant requis dans l'élaboration des critères hydrologiques d'aménagement des cours d'eau et des infrastructures hydrauliques.

Les méthodes et résultats pertinents à la représentation des risques d'exportation de phosphore (application GÉODEP), de même qu'à la vulnérabilité à l'érosion des fossés et cours d'eau, sont présentés en sections suivantes du rapport. La zone d'étude caractérisée couvre l'ensemble du bassin versant du Lac Boivin (21,024 ha), auquel a été ajoutée une zone tampon de 1 km au pourtour de son périmètre, de façon à permettre la caractérisation complète des champs partiellement inclus dans les limites du bassin versant. La zone d'étude caractérisée couvre ainsi une superficie totale de 29,909 ha. Pour les fins de comparaison avec les résultats des suivis hydrométriques, les flux cumulés prédits pour les sous-bassins Bouchard et Yamaska Nord (19,497 ha au total) sont considérés représentatifs du flux global de P au Lac Boivin (bassin de 21,024 ha). Retenons toutefois que la contribution d'une superficie de 1,527 ha (7.3% de la superficie globale du bassin versant du Lac Boivin) est exclue de cette estimation.

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 détails par Drouin et al. (2014) et Michaud et al. (2008).

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 ressources naturelles du Québec (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).

Occupation du sol

La zone d'étude de 29,927 hectares est occupée à 59% par la forêt, alors que 23% de sa superficie est dédiée aux activités agricoles. Celles-ci reflètent les principales vocations agricoles du territoire à l'étude, soit les productions laitières, de grandes cultures et maraîchères. L'occupation du sol pour l'année de référence 2010 documentée par le MRN (2010) dans sa cartographie écoforestière est présentée au tableau 9 et illustrée en figure 15.

Hydrographie

La délimitation des bassins versants et les 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 16). Au préalable, le réseau hydrographique a été « brûlé » dans le SIG (figure 17) afin d'éliminer l'effet des ponceaux et assurer des parcours continus des écoulements, utilisés en intrants aux routines de calculs hydrologiques (figure 17). Les directions et les accumulations des parcours de l'eau ont été colligés et regroupés en sous-bassins dont le seuil minimal de superficie a été fixé à 1% de la zone d'étude. La figure 18 illustre la délimitation des sous-bassins générés pour l'ensemble du bassin versant du Lac Boivin, de même que les délimitations des trois sous-bassins sous suivis hydrométriques, soit les ruisseaux Bouchard et Ostiguy, de même que le sous-bassin de la Yamaska Nord.

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 présentes dans la portion aval du bassin. Chaque polygone de série de sol est documenté dans la banque de données hydro-pédologiques. 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 (figure 20) sont tirés de l'étude de Beudet et al. (2009). Ces résultats de dosages des sols ont été colligés 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.

Tableau 9. Superficies des principales classes d'occupation du sol de la zone d'étude.

Utilisation du territoire	Superficie (ha)	Pourcentage
Forêts	17 710	59.18%
Foin	4 713	15.75%
Centre urbain	3 245	10.84%
Cultures non assurées	1 483	4.95%
Eau	1 064	3.56%
Mais	394	1.32%
Aulnaie	269	0.90%
Zone dénudée et semi-dénudée humide	199	0.67%
Soya	149	0.50%
Terrain de golf	148	0.49%
Autoroute	81	0.27%
Cultures mixtes	71	0.24%
Piste de ski	60	0.20%
Villégiature	61	0.20%
Zone inondée	53	0.18%
Milieu faiblement perturbé	51	0.17%
Blé	38	0.13%
Ligne de transport	36	0.12%
Gravière	31	0.11%
Petits fruits	20	0.07%
Ile	14	0.05%
Milieu fortement perturbé	14	0.05%
Zone défrichée	8	0.03%
Autres cultures	7	0.02%
Barrage hydroélectrique	5	0.02%
Verger	3	0.01%

Source : MRN, 2010. Carte écoforestière.

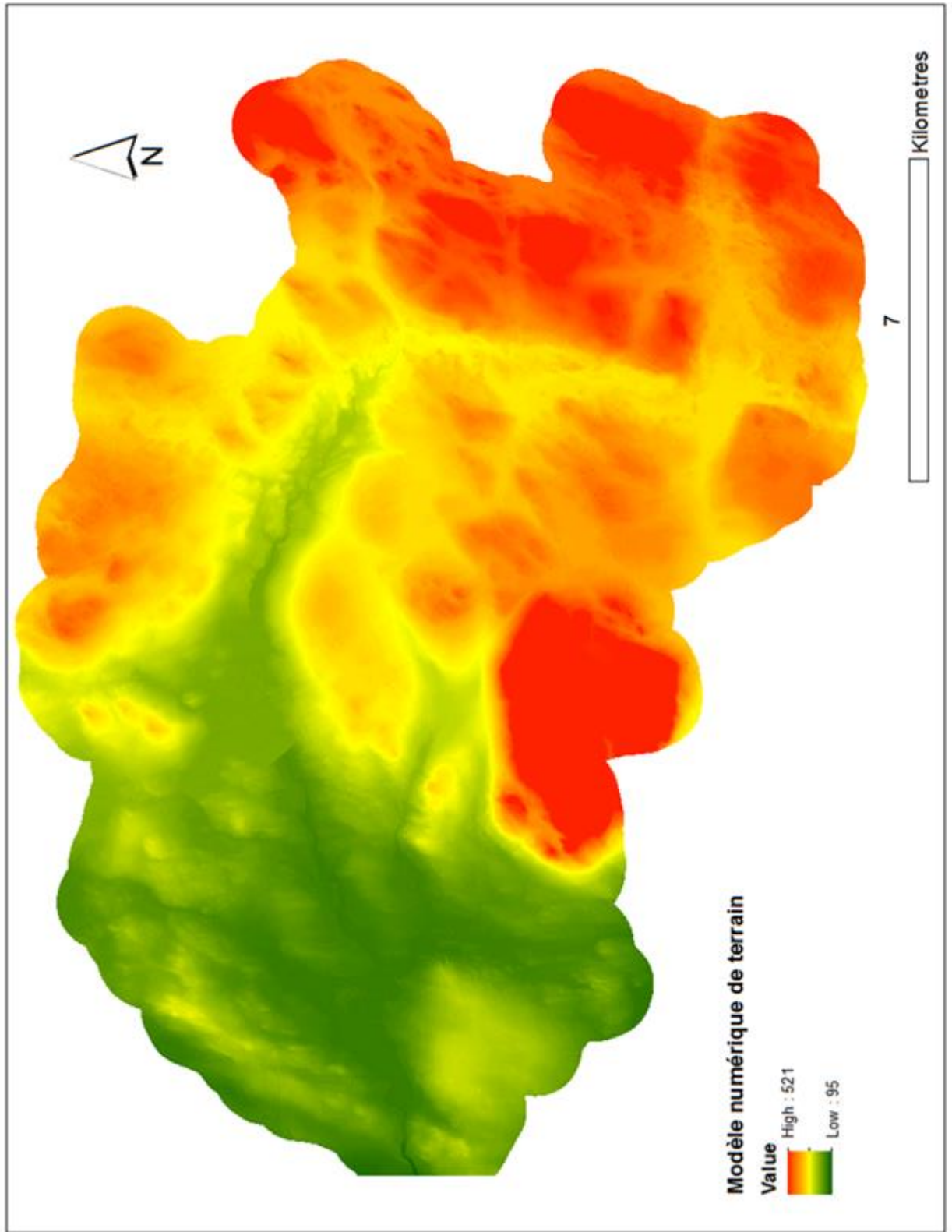


Figure 16. Modèle numérique d'altitude généré de la zone d'étude.

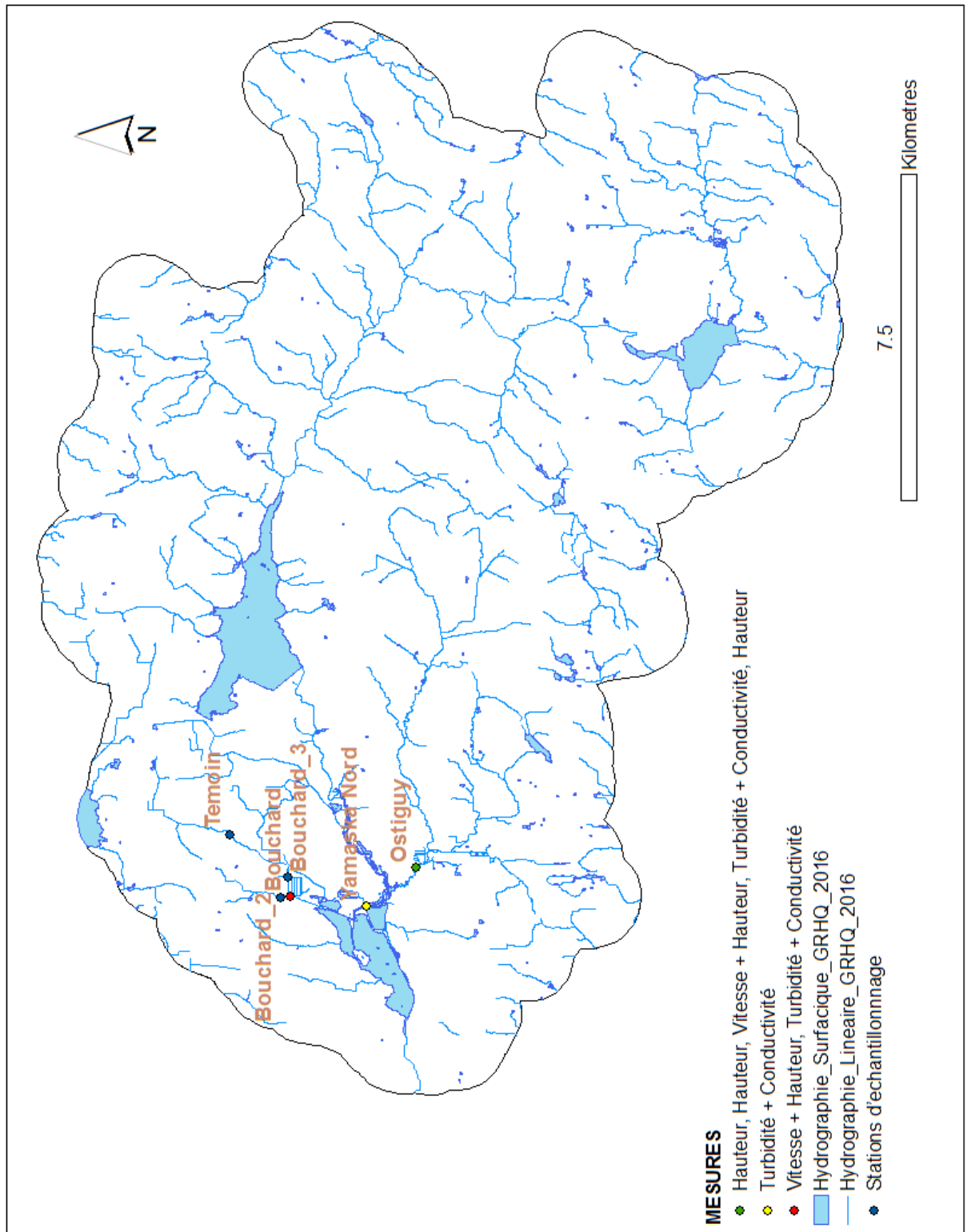


Figure 17. Hydrographie du bassin versant de la zone d'étude.

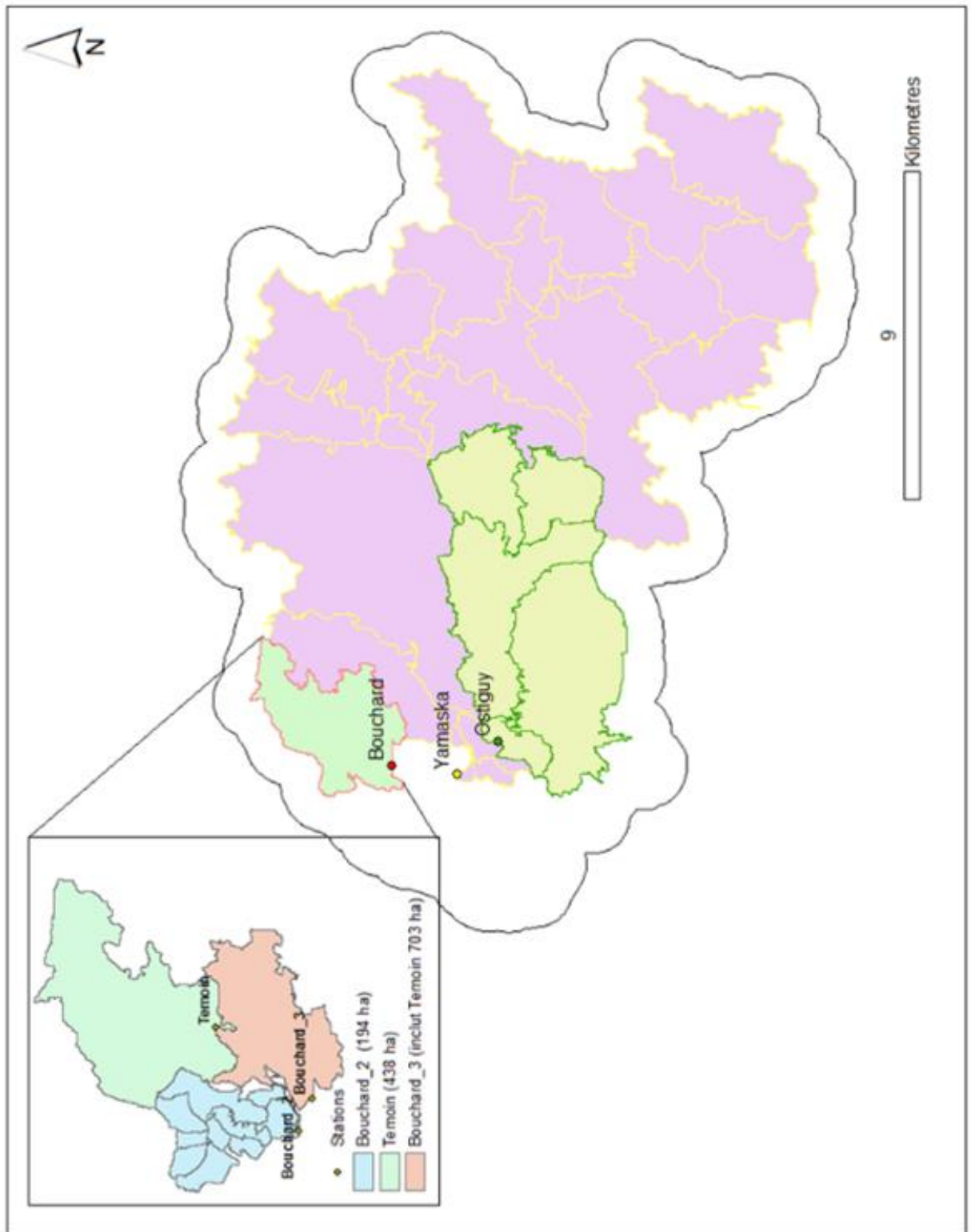


Figure 18. Délimitation des sous-bassins hydrographiques du bassin versant du Lac Boivin et de la zone d'étude.

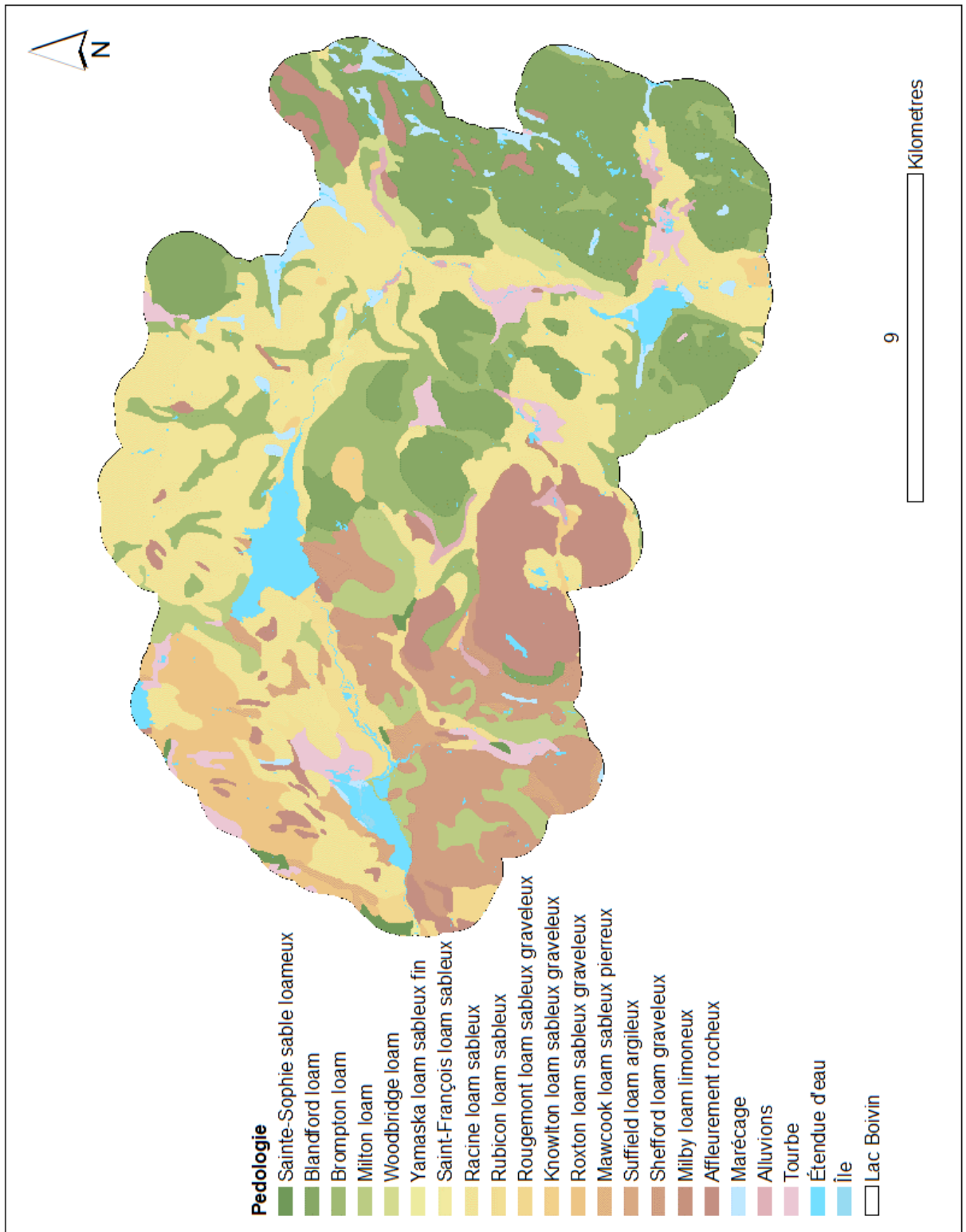


Figure 19. Cartographie pédologique des sols de la zone d'étude.

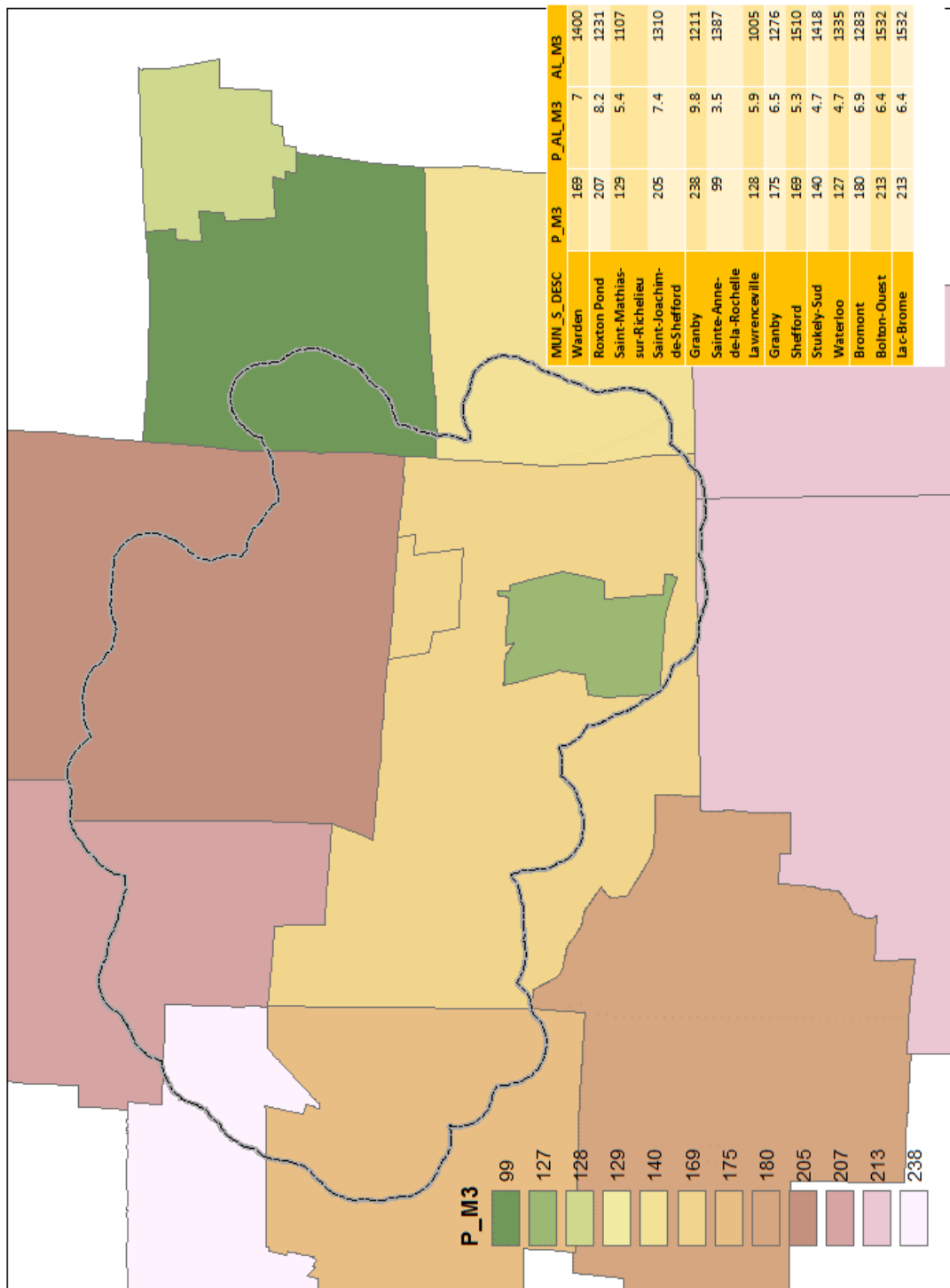


Figure 20. Richesse moyenne en P assimilable (Mehlich-3) des sols agricoles des municipalités de la zone d'étude (Beudet et al., 2009).

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.

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 réponse hydrologique 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, de l'érosion et de l'exportation de phosphore.

Scénarios de gestion du parcellaire

ODEP et GéODEP ont été développés principalement afin d'évaluer les risques d'exportations 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 liste des caractéristiques des champs et des pratiques culturales utilisée en intrants par GéODEP est reproduite en annexe I du présent document.

La documentation des pratiques de gestion courantes du parcellaire (scénario de référence) 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.

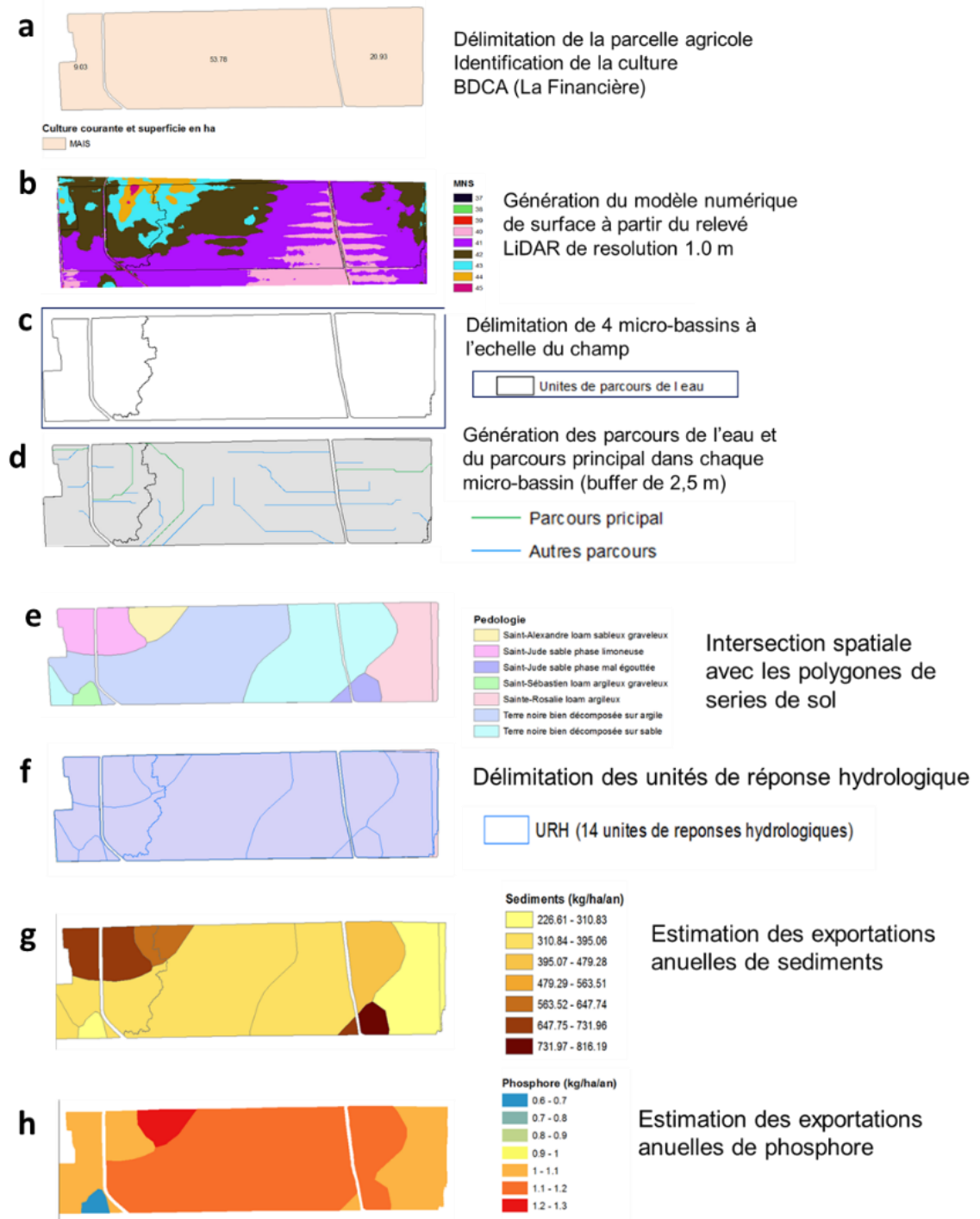


Figure 21. Illustration des différentes étapes de traitement des données à référence spatiale dans GÉODEP pour une portion de territoire à vocation agricole.

Pour les fins de la présente étude, trois scénarios de gestion ont été retenus en intrants aux simulations dans GÉODEP. Le tableau 10 résume les principales caractéristiques des scénarios de régie des sols retenus pour ces derniers.

Le scénario de Référence se veut le plus représentatif possible de la régie actuelle du parcellaire agricole du bassin versant. Pour le territoire de la Ville de Granby, les données de régie des cultures sur les 172 parcelles colligées dans le cadre du projet ont été mises à contribution dans le paramétrage du modèle. Pour la portion restante du territoire agricole du bassin versant, les données de la Financière (2017) et de la carte écoforestière 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 retenues dans le scénario de référence appliqué à l'ensemble du bassin versant en amont de la Ville de Granby.

Un scénario de régie uniforme « Tout maïs » labouré à l'automne met en relief l'influence des propriétés des sols sur les prédictions hydrologiques d'exportation de sédiments et de phosphore. Ces estimations projettent par ailleurs des exportations très élevées de sédiment et de phosphore, compte tenu de la vulnérabilité du système de cultures annuelles sous labour.

Un scénario de Conservation des sols, à l'opposé, simule la généralisation de pratiques culturales de conservation sur les champs identifiés à la production de culture annuelles dans le scénario de référence. Le recours aux semis directs des cultures, aux cultures de couverture, de même qu'à l'aménagement de bandes riveraines élargies et de structures contrôle du ruissellement sont alors simulés à l'échelle du bassin versant.

Tableau 10. Hypothèses de gestion du parcellaire agricole retenues pour l'estimation des risques d'exportations de sédiments et de phosphore dans GÉODEP à l'échelle du bassin versant du Lac Boivin.

Scenario : Référence	Valeur
Travail du sol	Maïs : labour à l'automne;
	Foin : sans travail du sol
	Soya : semi direct/;
	Céréales: déchaumage à l'automne;
Drainage	Maraîcher : labour à l'automne.
	Souterrain : systématique. Surface : amélioré (moyen).
Bande riveraine	Inférieure à 1 m.
Structure de captage	Partielle pour le maïs et le soya, absente pour les autres cultures.
Fertilisation organique	50 kg P2O5/ha sur le maïs et les céréales à paille en pré-semis, en post-levée sur les prairies après coupes.
Fertilisation minérale P	25 kg P2O5/ha sur les cultures annuelles; 60 kg P2O5 sur les cultures maraîchères.
Scenario : Conservation	Valeur
Travail du sol	Semi-direct.
Drainage	Idem au scénario de référence.
Bande riveraine	Élargie, supérieure à 4 mètres.
Structure de captage	Systématique pour les cultures annuelles.
Fertilisation organique	Idem au scénario de référence.
Fertilisation minérale P	Idem au scénario de référence.
Culture de couverture	Pour les céréales.

4.2.2 Résultats de l'estimation des risques d'exportation de sédiments et de phosphore

La figure 22 illustre la projection des indices de risques d'exportation de sédiments et de phosphore pour l'ensemble de la zone d'étude selon le scénario de référence, le scénario de conservation des sols et le scénario de culture de maïs sous labour. Globalement, à l'échelle de la zone d'étude, les indices ont été estimés pour plus de 20,400 unités de réponse hydrologique. Pour le parcellaire agricole, l'ensemble des routines de calcul de GÉODEP a été mis à profit dans l'estimation du risque de ruissellement, d'érosion et d'exportation de phosphore.

Le taux d'exportation de sédiments pour le parcellaire non agricole, principalement représenté par le milieu forestier, a été fixé à 75 kg MES/ha-an suivant un calage sommaire des prédictions d'exportation de sédiments sur la base des observations hydrométriques 2016-2017. Les taux d'exportation de phosphore pour le parcellaire agricole (5,980 unités de réponse hydrologique) ont aussi été estimés par les algorithmes de calcul de GÉODEP. Pour les occupations non agricoles du territoire, les coefficients d'exportation annuels (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. Respectivement, les coefficients d'exportation annuels retenus expriment la contribution annuelle moyenne en phosphore total des secteurs urbanisés (0,72 kg P/ha), de la forêt (0,14 kg P/ha), des milieux humides (0,72 kg P/ha), des milieux perturbés (0,26 kg P/ha), des golfs (0,88 kg P/ha) et des lignes de transport et pistes de ski (0,18 kg P/ha).

Le tableau 10 rapporte le cumul des charges annuelles de sédiments et de phosphore estimées par classes principales d'occupation des sols pour les sous-bassins Bouchard, Ostiguy, Yamaska Nord. Les charges au Lac Boivin sont pour leur part estimées sur la base des cumuls des charges prédites pour les sous-bassins Yamaska Nord et Bouchard (92,7% de la superficie totale du bassin versant du Lac Boivin). Sur cette base, la charge globale prédite au Lac Boivin est de l'ordre de 7,59 tonnes de phosphore par an. Cette estimation apparaît légèrement sous-estimée, de l'ordre de 11 %, sur la base de la comparaison avec les résultats des suivis hydrométriques 2016-2017 des sous-bassins Yamaska Nord et Bouchard, qui cumulent 8,53 tonnes de P par an. Rappelons cependant que les charges de sédiments et de phosphore sont appelées à varier considérablement d'une année à l'autre pour un bassin donné. Les flux annuels de P total mesurés au bassin versant du ruisseau Ewing en Montérégie, par exemple, varient de 1,9 tonnes de P en 2004, à 7,0 tonnes de P en 2008 (Projet Lisière Verte; Madramootoo et al., 2012). Aussi, GÉODEP a été conçu de façon à représenter les flux annuels moyens de sédiments et de nutriments. En ce sens, un écart de 11% du flux global de P prédit par rapport aux relevés hydrométriques sur une période d'une seule année est ici considéré comme marginal.

La répartition des indices par classe d'occupation du territoire attribue 60% de la charge totale de phosphore au Lac Boivin (4,571 kg P/an, cumul des bassins Bouchard et Yamaska Nord) à l'occupation agricole du territoire, qui occupe 25% de la superficie du bassin

versant. Les occupations forestière (60% de la superficie) et urbanisée (8% de la superficie) sont associées, respectivement, à 22 et 15 % des charges de P. En ce qui a trait à la contribution des milieux humides, la charge annuelle prédite de P est de l'ordre de 376 kg P/an. Cette estimation reflète le taux spécifique d'exportation annuel de 0,72 kg/ha-an retenu et appliqué aux 522 ha de la cartographie écoforestière associée aux milieux humides (zones inondées, dénudées/humides et aulnaie).

La comparaison de ces prédictions avec les mesures de charges de sédiments et de phosphore aux trois stations hydrométriques appelle cependant à nuancer cette répartition. En effet, considérant les charges mesurées aux stations hydrométriques (tableau 6), les flux cumulés de sédiments prédits par GÉODEP sont plus élevés, dans l'ordre de +114%, que les flux mesurés pour le bassin de la Yamaska Nord, et de +37% pour le bassin Ostiguy. À l'inverse, au sous-bassin Bouchard, le cumul des charges prédites de sédiments par GÉODEP est plutôt de l'ordre de 21% inférieur aux charges mesurées de MES.

Globalement, plusieurs facteurs d'ordre méthodologique contribuent à expliquer ces écarts. D'abord, rappelons que GÉODEP estime les risques d'émissions de sédiments et de phosphore dans le ruissellement depuis le parcellaire (milieu terrestre). Aussi, il ne traduit pas l'influence des phénomènes qui se produisent en rivière, notamment, les processus de sédimentation dans les plans d'eau. Les relevés hydrométriques des sous-bassins Yamaska Nord et Ostiguy, commentés antérieurement, témoignent de l'influence de ces phénomènes de sédimentation. Ceux-ci ont pour effet d'atténuer les flux de sédiments entre les zones d'émission en amont, et l'exutoire du bassin à l'aval. Ainsi, il n'est pas surprenant de constater que les émissions prédites par GÉODEP soient inférieures aux flux mesurés à l'aval des bassins influencés par les processus de sédimentation.

À l'inverse, la charge de sédiments du micro-bassin Bouchard n'est pas surestimée par les indices GÉODEP, mais plutôt sous-estimée de -21%, reflétant vraisemblablement une influence marginale des processus de sédimentation. Les processus d'érosion en rive de cours d'eau pourrait cependant contribuer à l'explication des écarts entre les prédictions et les observations. En effet, précisons que GÉODEP estime les émissions de sédiments et de nutriments depuis le parcellaire et n'inclut pas, dans ses calculs, les contributions associées aux processus d'érosion en cours d'eau. Une contribution de 21% des processus d'érosion riveraine aux charges globales de sédiments en rivière en milieu rural est dans l'ordre de grandeur des estimations rapportées dans la littérature scientifique.

Rappelons par ailleurs que la majeure partie du bassin Boivin est sous occupation forestière ou urbanisée et s'est ainsi vu attribuer une émission générique de sédiments de 75 kg MES/ha-an. Aussi, l'interprétation de la vulnérabilité du parcellaire à l'érosion doit se limiter aux secteurs agricoles, où les algorithmes de calcul de GÉODEP ont été appliqués.

À l'instar des flux de sédiments, le cumul des charges prédites en phosphore par GÉODEP diffère des charges observées aux stations hydrométriques. Pour le grand sous-bassin de la Yamaska Nord, les estimations GÉODEP sous-estiment de façon marginale le flux de P,

dans l'ordre de -6%. Pour les sous-bassins Bouchard et Ostiguy, les différences sont marquées et indiquent une importante sous-estimation par rapport aux mesures hydrométriques, de l'ordre de -56% au ruisseau Bouchard, et de -23% au ruisseau Ostiguy. Ces disparités peuvent être tributaires de plusieurs facteurs. Dans un premier temps, rappelons que les indices d'exportation de P attribués aux occupations non-agricoles du territoire proviennent de l'étude de Winchell et al.(2011) et sont estimés représentatifs des conditions climatiques et hydrologiques de la zone d'étude. Pour le secteur agricole, une explication plausible à des estimations d'indices d'exportation de P inférieures aux taux d'exportation mesurés pourrait être liée à un déficit de représentativité du scénario de gestion retenu, notamment sur le plan des apports de P et de richesse des sols. Cette hypothèse serait supportée par la nature soluble de la charge de P mesurée à l'exutoire du ruisseau Bouchard, tel que rapporté antérieurement. Un autre facteur d'incertitude est lié à la présence de sols organiques en culture dans le bassin Bouchard. Peu d'études ont documenté les flux de P en terres noires. Des flux annuels atteignant près de 6 kg P/ha-an ont été mesurés en Montérégie Ouest sur un micro-bassin versant dédié à la culture maraîchère en sols organiques (Michaud et al, 2012). Les modules actuels de GÉODEP ne sont cependant pas adaptés à la représentation des processus hydrologiques particuliers aux sols organiques.

Les disparités entre les valeurs observées et prédites de flux de sédiments et de nutriments rappellent que l'intérêt des prédictions de GÉODEP tient essentiellement à leur valeur relative, en permettant de contraster les effets des propriétés du paysage et de la gestion du parcellaire sur le devenir du phosphore. Les indices GÉODEP estimés pour les différentes classes de culture (tableau 10) traduisent bien leur pouvoir discriminant de la vulnérabilité du parcellaire agricole 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 2,60 kg P/ha-an pour les superficies en maïs, à 0,66 kg P/ha-an pour la prairie.

La variabilité des propriétés des sols et du relief à l'échelle du bassin contribue aussi à la discrimination spatiale dans les exportations prédites de phosphore, tel qu'en témoigne les représentations cartographiques des indices de la figure 22. À titre d'exemple, le risque d'exportation de P pour la culture de maïs dans le sous-bassin Yamaska Nord est en moyenne (2.88 kg/P-ha-an) deux fois plus élevé que celui estimé pour le ruisseau Bouchard (1.44 kg/P-ha-an), reflétant un indice d'exportation de sédiments (2.1 T MES/ha-an) quatre fois plus élevé qu'au Bouchard (0.5 T MES/ha-an). Au final, la distribution spatiale des indices de vulnérabilité aux exportations de phosphore indique qu'environ 20% du territoire est associé à 50% des exportations de phosphore.

En appui à la planification d'actions concertées ciblées sur la réduction des exportations de phosphore, l'intérêt de GÉODEP réside d'abord dans l'identification des zones critiques d'émissions de P, puis dans la possibilité d'évaluer différents scénarios d'intervention sur le devenir des charges de P émises. À titre d'exemple d'application de l'outil, la figure 22 illustre les prédictions des exportations de sédiments et de P résultant de l'application d'un scénario de conservation des sols à l'ensemble du parcellaire agricole. Sans apporter de changement dans les cultures, le scénario exprime le recours généralisé aux pratiques

culturales de culture sur résidus (sans labour), aux cultures de couverture, de même qu'à l'aménagement de bandes riveraines élargies et des structures de contrôle du ruissellement (fossés-avaloirs par exemple). Pour l'ensemble de la superficie en culture de la zone d'étude (6,900 ha), la charge estimée du scénario de référence passe de 5,657 tonnes de phosphore par an à 2,883 T P/an pour le scénario de conservation. Cette réduction prédite de la charge de P est principalement tributaire de l'atténuation des processus d'érosion dans la culture de maïs. Estimée en moyenne à 2,60 kg P/ha-an pour l'ensemble du bassin versant, la charge spécifique de phosphore passe à 1,34 kg P/ha-an en scénario de conservation. L'atténuation de la charge tient alors principalement au contrôle de l'exportation de sédiments, dont les charges spécifiques prédites passent de 1,9 tonne par an au scénario de référence, à 0,6 tonnes pour le scénario de conservation.

À l'opposé, le scénario de culture « Tout maïs » (figure 22) illustre une conversion de toutes les superficies en culture du bassin versant (6,900 ha) vers le maïs, qui n'occupait que 394 ha en 2017 (La Financière, 2017). Une pratique culturale conventionnelle, avec labour d'automne est alors appliquée de façon systématique. L'intérêt de ce scénario, purement hypothétique, tient à l'illustration de la vulnérabilité intrinsèque des sols aux processus d'émission de ruissellement et d'exportation de sédiments et de phosphore, alors que le même scénario de gestion est appliqué à tout le parcellaire agricole. À titre indicatif, la charge totale prédite de P du parcellaire agricole du bassin versant passe à 17,2 tonnes de P par an en scénario « Tout maïs », soit près du triple que celle prédite pour le scénario de référence.

4.2.3 Indexation du groupe hydrologique des sols et indices de risque d'érosion des cours d'eau et fossés

L'analyse des risques d'exportation de sédiments et de phosphore supportée par GÉODEP ne s'applique qu'aux superficies en cultures et autres occupations non agricole du territoire. Elle ne traduit d'aucune façon les processus à l'œuvre dans le réseau de fossés et de cours d'eau, tant au plan de la sédimentation qu'aux processus d'érosion des rives et de leur lit. Ces processus demeurent toutefois déterminants de la qualité de l'eau et des habitats aquatiques. Il est en effet généralement estimé que les processus d'érosion active dans les fossés et les cours d'eau contribuent à une part significative de la charge globale de sédiments et de phosphore exporté du bassin versant. Des évaluations scientifiques réalisées au Vermont, dans des bassins transfrontaliers avec la Montérégie et l'Estrie, ont établi que 40% des charges de sédiments et de phosphore étaient associées aux processus d'érosion en cours d'eau (Winchell et al., 2011).

En contribution complémentaire à l'analyse des risques d'érosion du parcellaire du bassin versant du Lac Boivin, une évaluation sommaire de la vulnérabilité des fossés et des cours d'eau à l'érosion a été produite dans le cadre de la présente étude. Cette évaluation tire profit du relevé LiDAR à haute résolution afin d'analyser systématiquement toutes les pentes du réseau d'hydrographie linéaire et du réseau de routes complémentaires du réseau national des routes (chemins, routes pavées et non pavées) en excluant les autoroutes. Les pentes à chaque 100 m ont été calculées et un indice global de vulnérabilité à l'érosion a été généré pour chacun des tronçons, suivant une approche multiplicative estimant le produit de la pente et du facteur d'érodabilité des sols traversés par ces cours d'eau (facteur k de l'équation de universelle de perte de sol; Michaud et al., 2008). La distribution spatiale des indices de risque générés pour l'ensemble du bassin versant du Lac Boivin est illustrée en figure 23. De façon globale, la distribution spatiale des indices de risque illustre une forte discrimination où les secteurs les plus vulnérables conjuguent de fortes inclinaisons à une érodabilité élevée du sol. En pratique, ce portrait sommaire s'avère utile à l'appréhension de problématiques d'érosion des fossés et cours d'eau et à l'attention à porter à des mesures de mitigations dans les secteurs vulnérables.

En perspective de développement complémentaire, la compréhension des processus de stabilité des cours d'eau de la région d'étude profiterait d'un portrait hydrogéomorphologique du bassin versant. L'estimation des puissances spécifiques, notamment, permet d'identifier les tronçons où la rivière a la capacité de retravailler son lit. Les zones de diminution de la puissance spécifique peuvent être reliées à des processus de sédimentation, alors que des zones présentant une augmentation de la puissance spécifique sont plutôt associées aux processus d'érosion du lit et des rives du cours d'eau. Une application de cette approche dans le secteur aval du bassin versant de la rivière Yamaska est bien illustrée par Roux (2012).

En terminant, la figure 23 illustre la distribution des numéros de courbe hydrologique (courbes CN) associés au scénario de gestion de référence (GÉODEP) à l'échelle du bassin versant du Lac Boivin. Cette cartographie a été générée avec le support du modèle hydrologique SWAT 2016, appliqué au même paramétrage des données d'entrée que celui utilisé dans l'application de GÉODEP. Les CN ont ainsi été générés pour les mêmes unités spatiales (Unités de réponse hydrologique homogène) que l'application GÉODEP. En complément des autres couches d'information à référence spatiale générées dans le cadre de ce projet, le numéro de courbe CN est un intrant utile à la conception des ouvrages et infrastructures hydrauliques.

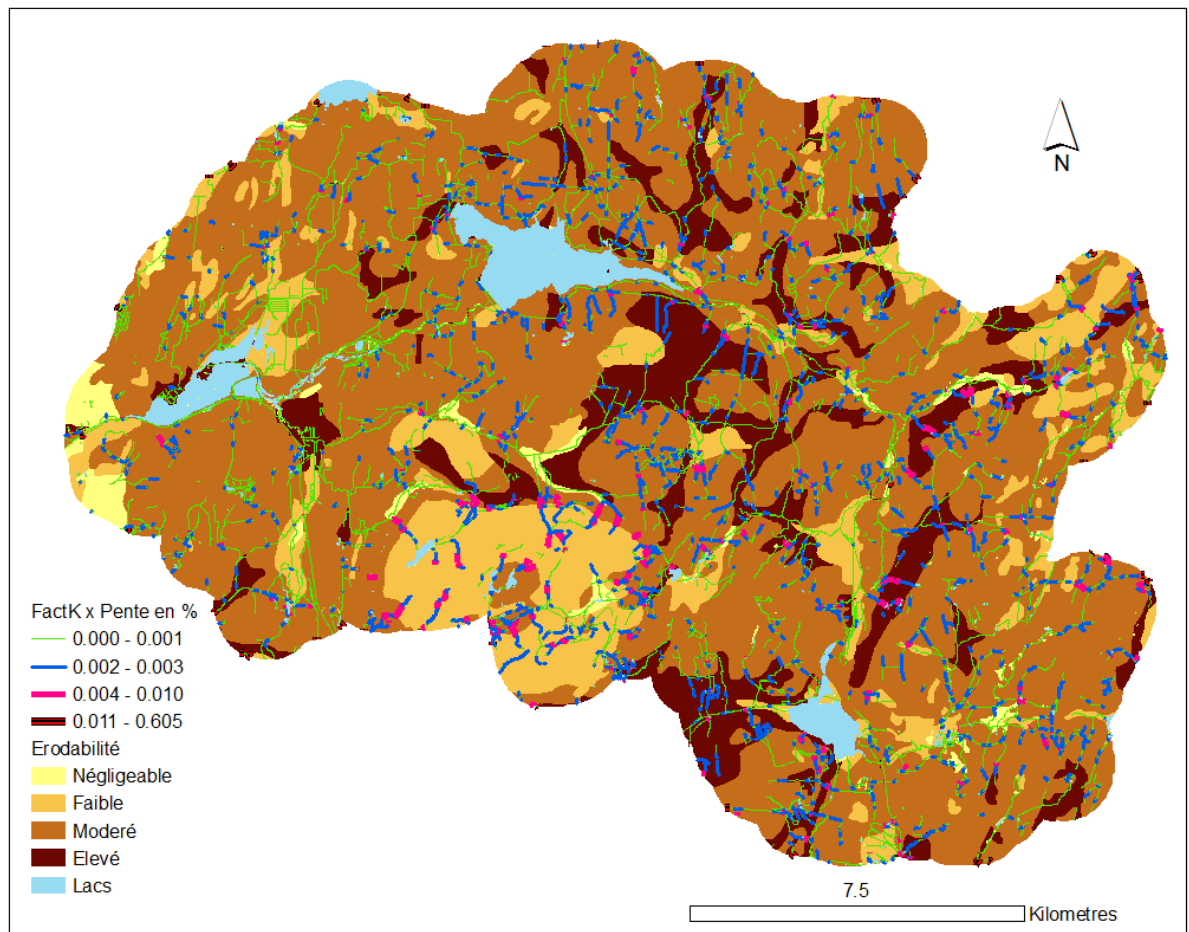


Figure 23. Indices de risque d'érosion des fossés et des routes à l'échelle du bassin versant du Lac Boivin.

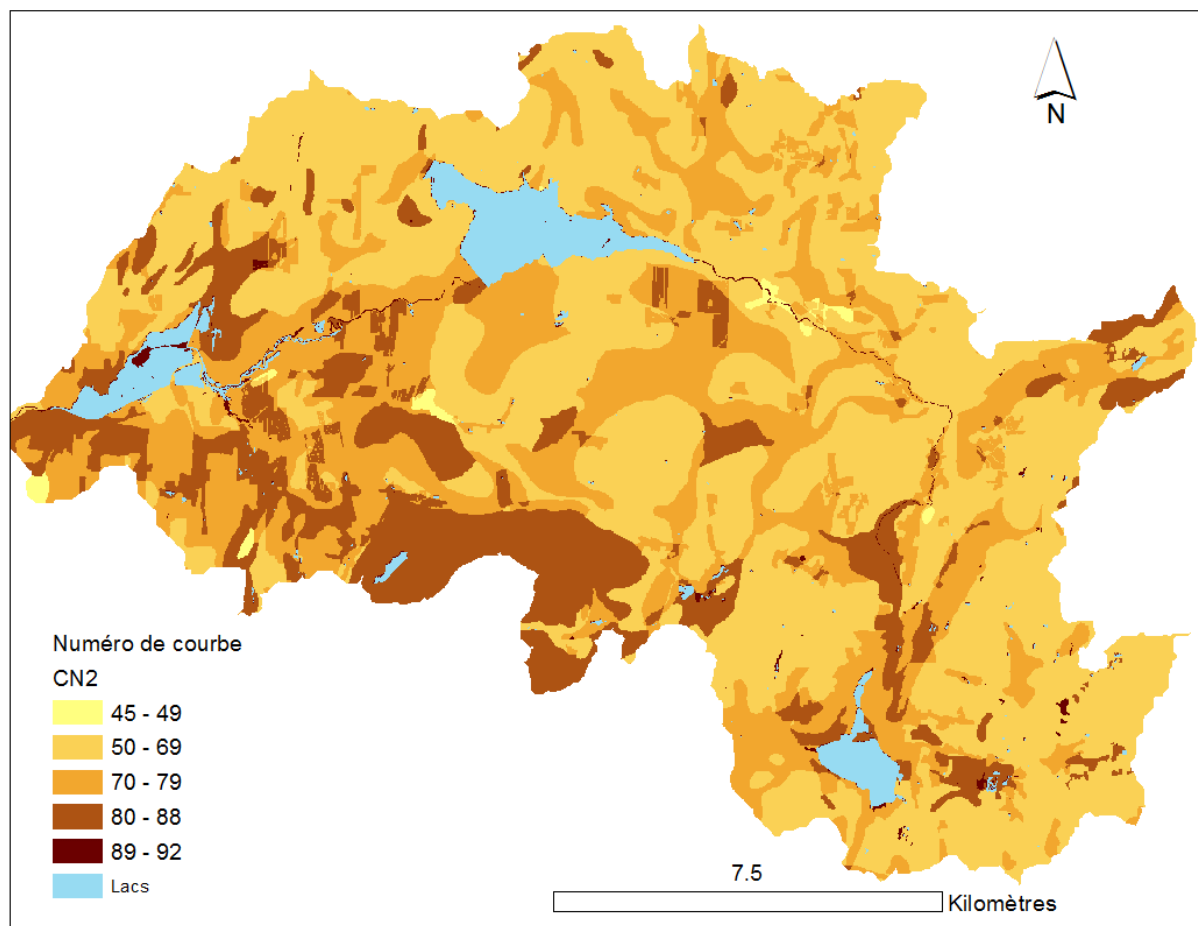


Figure 24. Numéros de courbe hydrologique associée au scénario de gestion de référence à l'échelle du bassin versant du Lac Boivin.

4.3 Conclusions du volet de modélisation hydrologique

L'application de l'outil GÉODEP du bassin versant du lac Boivin illustre la vulnérabilité spatiale du territoire aux exportations de phosphore. Globalement, le cumul des indices d'exportation de P de plus de 20,000 unités de calcul est représentatif du flux annuel estimé de P au lac Boivin pour la période d'étude. Les disparités entre les charges prédites et mesurées aux bassins Bouchard, et dans une moindre mesure au bassin Ostiguy, démontrent cependant les limites dans l'application de l'outil à grande échelle, suivant des scénarios généralisés de gestion pour le parcellaire agricole, et des indices d'exportation généralisés pour l'occupation non agricole du territoire. Retenons que les mesures hydrométriques, en cours d'eau, demeurent la seule approche fiable de quantification globale des charges de sédiments, phosphore et autres nutriments au lac Boivin.

GÉODEP est un outil d'analyse du risque à l'échelle spatiale fine, dont les prédictions sont sensibles à l'interaction de plusieurs facteurs à l'échelle intra-parcellaire. Aussi, son

utilisation se destine principalement à l'interprétation du risque et l'évaluation de scénarios alternatifs de gestion dans une perspective d'accompagnement des producteurs agricoles, et supportée par des données précises sur les propriétés des sols et de leur régie.

Retenons enfin que les algorithmes de calcul derrière l'outil GéODEP reflètent l'état des connaissances sur les processus de ruissellement, d'érosion et de mobilisation de phosphore, développées principalement de façon empirique sur la base d'observations colligées au Québec en dispositifs de parcelles expérimentales, au champ et en micro-bassins versants (Michaud et al. 2009a). Aussi, l'outil a profité de mises à jour dans le cadre de la présente application au bassin versant du lac Boivin, notamment au plan de l'analyse des parcours de ruissellement dérivé du relevé LiDAR à haute résolution. D'autres adaptations aux modules de GéODEP sont également en cours de développement (Michaud et al., 2017), reflétant le développement de nouvelles connaissances sur les réponses hydrologiques du parcellaire au climat, aux propriétés des sols, de même qu'à l'aménagement des terres et leur régie.

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.

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. 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 met 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 :

- 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, relativement plus importante que les 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 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 avec la capacité du sol à fixer 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 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 facilite 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 incorporé dans les champs, conduit à des pertes de phosphore événementielles très élevées. L'incorporation des engrais de ferme au moyen d'un travail superficiel du sol élimine à toutes fins pratiques 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-levée 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-soja 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 que 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'égoutte par les fossés de drainage, et non par la bande riveraine. Le recours aux structures de captage et de sédimentation permet 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 défenses. Ces solutions sont connues, et sont le plus souvent « gagnant-gagnantes », 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.

6 RÉFÉRENCES CITÉES

- Beaudet, 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/>
- 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 Waste Water, 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.
- 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/>

- 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/>
- Michaud, A.R., Lauzier, R., et M. R.Laverdière. 2005. Mobilité du phosphore et intervention agroenvironnementale en bassin versant agricole: Etude 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., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beaudet 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. 2012a. 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. 2014a. 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 et F. Landry. 2017. Outil-de-diagnostic-et-de-prediction-des-exportations-diffuses-de-sediments-et-nutriments (GÉODEP+N). Projet de recherche. Programme Innovaction

<https://www.irda.qc.ca/fr/projets/outil-de-diagnostic-et-de-prediction-des-exportations-diffuses-de-sediments-et-nutriments-geodep-n/>

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/>

Ministère des ressources naturelles du Québec, 2010. Carte écoforestière.
[http://iris.banq.qc.ca/alswww2.dll/APS_CAT_IDENTIFY?Method=CatalogueExplore&IsTagged=0&DB=BookServer&ExploreType=Subject&Stem=SIEF%20\(Syst%C3%A8me%20d%27information\)%20&Style=Portal3&SubStyle=&Lang=FRE&ResponseEncoding=utf-8&Parent=Obj_55181311766356](http://iris.banq.qc.ca/alswww2.dll/APS_CAT_IDENTIFY?Method=CatalogueExplore&IsTagged=0&DB=BookServer&ExploreType=Subject&Stem=SIEF%20(Syst%C3%A8me%20d%27information)%20&Style=Portal3&SubStyle=&Lang=FRE&ResponseEncoding=utf-8&Parent=Obj_55181311766356)

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.

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.

Annexe I. Données utilisées en intrants dans la création de scénarios de gestion dans 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	Contenue 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)

