

RAPPORT FINAL

CARACTÉRISATION HYDROLOGIQUE DES RUISSEAUX AFFLUENTS DES CANAUX DE SAINT-ZOTIQUE : GRAND MARAIS, SIX ARPENTS ET DIX-HUIT ARPENTS



Responsable scientifique : Aubert R. MICHAUD, PhD, chercheur

Rapport présenté   la Municipalité de Saint-Zotique

Date : 30 avril 2020

CARCTÉRISATION HYDROLOGIQUE DES COURS D'EAU DE SAINT-ZOTIQUE (GRAND MARAIS, SIX ARPENTS, DIX-HUIT ARPENTS)

Rapport final

Présenté à :

Municipalité de Saint-Zotique

1250, rue Principale (Québec) CANADA J0P 1Z0

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Aubert R. Michaud, Ph. D., IRDA
- Mohamed Abou Niang, Ph.D., IRDA
- Arianne Blais-Gagnon, M.Sc. IRDA
- William Huertas, B.Sc., IRDA

COLLABORATEURS

- Anick Courval, Municipalité St-Zotique
- Véronique Quane, Municipalité St-Zotique

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Michaud, A.R., M.A. Niang, A. Blais-Gagnon, et W. Huertas. 2020. Caractérisation hydrologique des cours d'eau de Saint-Zotique (Grand Marais, Dix-huit Arpents et Six Arpents). Rapport final. IRDA. 53 pages plus Annexe.

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

RÉSUMÉ

Ce document présente les résultats d'une étude de caractérisation des trois principaux cours d'eau de la municipalité de Saint-Zotique, soit les ruisseaux du Grand Marais, du Dix-huit Arpents et du Six Arpents. L'objectif global du projet était d'appuyer les démarches de la municipalité de Saint-Zotique et de ses partenaires visant l'atténuation de l'envasement des canaux de la municipalité. L'étude a été réalisée suivant deux volets. Un premier volet d'étude hydrométrique a supporté la mesure des débits et des flux de sédiments et de nutriments (azote et phosphore) des trois ruisseaux entre juillet 2016 et mai 2019. Un deuxième volet d'étude a projeté la vulnérabilité du territoire des bassins versants des trois ruisseaux aux émissions de ruissellement de surface, de sédiments et de phosphore suivant une approche de modélisation hydrologique simplifiée à l'aide du méta-modèle GéODEP.

Le suivi hydrométrique des trois principaux ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique pendant trois années a mis en relief des réponses hydrologiques très contrastées entre les ruisseaux, pourtant voisins immédiats. Un fort gradient d'Ouest en Est dans la perméabilité des sols et l'occupation du territoire, et surtout les transformations apportées au réseau hydrographique modèlent les émissions de ruissellement, de sédiments et de nutriments mesurés aux exutoires des trois bassins versants à l'étude. La zone d'inondation qui s'étend dans le bassin versant du Grand Marais, jusqu'au bassin du Six Arpents, générée par le refoulement du ruisseau Léger, a un effet manifeste sur les débits et les flux de sédiments et de phosphore mesurés au ruisseau du Grand Marais, et dans une moindre mesure au ruisseau des Six Arpents, qui profite d'une évacuation artificielle (pompage). Dans l'ensemble, les épisodes de précipitations liquides en hiver et la période de fonte du couvert hivernal contribuent à l'essentiel des charges annuelles de sédiments des trois ruisseaux.

Les charges mesurées de sédiments des trois ruisseaux sont également très contrastées, alors que le ruisseau du Grand Marais se distingue à la hausse en raison notamment de son importante zone inondée. Considérant les seuls ruisseaux des Dix-huit et Six Arpents, principaux affluents de la zone des canaux de Saint-Zotique, la charge globale de sédiments charriée aux canaux demeure cependant modeste, soit dans l'ordre de 57 tonnes métriques par année. Lorsque pondérée pour la superficie des bassins versants des ruisseaux (1,207 ha), cette charge annuelle représente environ 50 kg de sédiments par hectare de bassin versant. Toutes proportions gardées, cette charge spécifique annuelle est marginale en comparaison des relevés similaires réalisés dans d'autres petits bassins versants agricoles de la Montérégie, qui atteignent entre 300 et 1,200 kg de sédiments par année.

Globalement, les charges spécifiques annuelles de phosphore total estimées pour les trois ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique reflètent les charges sédimentaires, avec des pics bien démarqués lors des épisodes de redoux et de fonte printanière. Les gradients spatiaux dans l'occupation du territoire, du drainage naturel des sols et de l'influence de la zone d'inondation expliquent encore ici le patron des exportations de phosphore. Sur le plan de l'azote, les mesures de concentration en nitrates des ruisseaux témoignent de teneurs élevées en périodes automnales tardives et printanières hâtives. Une implication pratique de ces concentrations en nitrates, hors saison de culture, est tout l'intérêt pour le secteur agricole de la région d'étude de rationaliser les apports engrais azotés apportés sur les terres.

La réalisation du volet d'étude en modélisation hydrologique a permis de projeter la vulnérabilité du territoire des bassins versants des trois ruisseaux de la municipalité aux émissions de ruissellement et exportations de sédiments et de phosphore. Dans l'ensemble, les taux d'érosion et de perte de phosphore les plus élevés pour la zone d'étude sont associées aux cultures soja et de maïs sur les sols peu perméables et labourés à l'automne. Les champs en culture de soja, bien que non labourés à l'automne, demeurent également vulnérables en raison d'une faible protection antiérosive offerte par des résidus de culture peu abondants. La vulnérabilité des champs demeure cependant fortement discriminée à l'échelle du territoire. Environ 20 % de la superficie en culture est associée à 60 % des pertes de sédiments projetées annuellement. Une implication pratique de cette projection par GÉODEP est toute la pertinence de cibler, au plan spatial, les actions agroenvironnementales en fonction de la vulnérabilité du parcellaire.

Le recours à l'outil GÉODEP, livré dans le cadre du projet, permet d'explorer, champ par champ, les effets de différents scénarios de gestion éventuellement envisagés par l'entreprise agricole et son conseiller, et ce dans les contextes de régie et de propriétés des sols propres à la parcelle. A ce titre, les résultats de l'étude suggèrent que l'implantation de cultures de couverture dans les champs de soja, la rotation avec des céréales d'automne, de même que la généralisation de la culture sur résidus (sans labour) dans les céréales à paille et le maïs apparaissent d'emblée comme des avenues les plus efficaces pour protéger les sols de l'érosion en période critique de ruissellement, depuis les récoltes automnales jusqu'au semis printaniers. L'investissement complémentaire dans l'aménagement de bandes riveraines élargies et de structures de captage et de sédimentation dans les fossés se justifie également sur le plan de la préservation des cours d'eau, particulièrement dans les secteurs affectés par l'inondation.

Soulignons enfin qu'une implication pratique à des apports marginaux de sédiments, depuis les bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique, est que d'autres sources de sédiments contribuent au problème d'ensablement/ensablement des canaux. Les phénomènes provenant du lac, en lien avec les vents d'automne et l'érosion de la plage seraient dès lors vraisemblablement impliqués. La nature sablonneuse, plutôt que limoneuse et argileuse, des dépôts observés à l'embouchure des canaux au fleuve favorise cette thèse des apports fluviaux.

TABLE DES MATIÈRES

1	Mise en contexte	1
2	Volet I : Étude Hydrométrique	2
2.1	Méthodologie	2
2.1.1	Description des sites d'étude	3
2.1.2	Aménagement et opération des stations hydrométriques	7
2.1.3	Campagnes d'échantillonnage des cours d'eau	10
2.2	Dépouillement des données hydrométriques.....	12
2.2.1	Débits des ruisseaux	12
2.2.2	Signatures géochimiques.....	15
2.2.3	Flux de sédiments et de nutriments.....	18
3	VOLET II : MODÉLISATION HYDROLOGIQUE.....	29
3.1	Méthodologie et résultats.....	29
3.1.1	Paramétrage du modèle.....	30
3.1.2	Projections des flux de sédiments et de phosphore	37
4	Discussion générale et Conclusions.....	45
	Références citées.....	48
	Annexe A – Données utilisées en intrants dans la création des scénarios de gestion de GÉODEP	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Occupation du territoire des bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique.	7
Tableau 2.	Description des instruments en place aux stations hydrométriques.....	7
Tableau 3.	Précipitations et hauteurs d'eau totales et moyennes annuelles exportées des ruisseaux du Grand Marais, Dix-Huit Arpents et Six Arpents.....	14
Tableau 4.	Concentrations (conc) moyennes pondérées pour le débit et charges annuelles et charges annuelles spécifiques (365 jrs, base ha) de calcium, de matières en suspension, d'azote et de phosphore estimées aux stations hydrométriques Grand Marais, Dix-huit Arpents et Six Arpents.....	22
Tableau 5.	Superficies et propriétés des sols et des séries et phases de sol de la zone d'étude.	31
Tableau 6.	Distribution des superficies en culture et de leurs classes de drainage respectives.	35
Tableau 7.	Distribution des superficies en culture et de leurs classes de travail du sol respectives.....	35
Tableau 8.	Projections des charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol pour le territoire à l'étude.	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Localisation des stations et des sous-bassins versants des stations hydrométriques du Grand Marais, Six Arpents et Dix-huit Arpents.	4
Figure 2.	Aperçu des sites des stations Grand Marais (a), Dix-huit Arpents (b) et Six Arpents (c).	5
Figure 3.	Figure 3. Occupation du territoire des bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique.	6
Figure 4.	Installation des équipements à la station du ruisseau du Grand Marais.	8
Figure 5.	Jaugeage du débit aux stations Dix-huit Arpents et Grand Marais à l'hiver 2018.	9
Figure 6.	Mesures du débit instantané, à l'aide du moulinet hydrométrique, à la station Dix-huit Arpents.	10
Figure 7.	Distribution dans le temps des débits journaliers moyens et des débits observés au moment des échantillonnages aux stations Grand Marais (a), Dix-huit Arpents (b) et Six Arpents (c).	11
Figure 8.	Séries chronologiques des débits spécifiques et des précipitations journalières observés aux trois stations hydrométriques pour la période de suivi de juillet 2016 à mai 2019.....	13
Figure 9.	Variation du débit, de la turbidité et de la conductivité au pas de temps de 15 minutes pour la crue du 6 avril 2017 observée aux trois stations hydrométriques.....	16
Figure 10.	Ancien et nouveau parcours du ruisseau Delisle (a) délimitation de sa zone d'inondation actuelle (Adapté de Lessard et Biron, 2017).	17

Figure 11.	Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO ₃) en fonction du débit spécifique (Qsp) et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique du Grand Marais.....	19
Figure 12.	Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO ₃) en fonction du débit spécifique (Qsp) et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique du ruisseau Dix-huit Arpents.....	20
Figure 13.	Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO ₃) en fonction du débit spécifique (Qsp) et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique de la rivière Six Arpents.....	21
Figure 14.	Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, de phosphore total et dissous, et des nitrates à la station hydrométrique Grand Marais.....	25
Figure 15.	Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, de phosphore total et dissous, et des nitrates à la station hydrométrique du ruisseau Dix-huit Arpents.....	26
Figure 16.	Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, de phosphore total et dissous, et des nitrates à la station hydrométrique du ruisseau Six Arpents.....	27
Figure 17.	Occupation du sol (a), pédologie (b), relief et hydrographie (c) des bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique. La correspondance de la numérotation des groupes hydrologiques (b) est la suivante : 3 :A; 5 :B; 7 :C et 9 :D.....	32
Figure 18.	Illustration des différentes étapes de traitement des données à référence spatiale dans GÉODEP pour une portion de territoire à vocation agricole.....	34
Figure 19.	Projection de la hauteur de ruissellement de surface du territoire à l'étude.....	40
Figure 20.	Projections des exportations annuelles de sédiments du territoire à l'étude.....	41
	42
Figure 21.	Projections des exportations annuelles de phosphore du territoire à l'étude.....	42
Figure 22.	Projections des taux spécifiques d'exportation de sédiments des unités de réponses hydrologiques homogène (URHH) en occupation agricole du territoire à l'étude en fonction de la hauteur du ruissellement de surface (a) et projections des taux spécifiques d'exportation de phosphore en fonction du taux d'exportation de sédiments (b).....	43
Figure 23.	Cumul des charges de sédiments par ordre décroissant de vulnérabilité du parcellaire en fonction de la superficie cumulée pour le scénario de gestion de référence appliqué au territoire des bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique.....	45

1 MISE EN CONTEXTE

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

À l'automne 2016, la municipalité de Saint-Zotique a mandaté l'IRDA pour la réalisation d'un suivi hydrométrique des ruisseaux Grand Marais, Dix-huit Arpents et Six Arpents afin de caractériser leurs flux respectifs de sédiments et de nutriments (azote et phosphore) en provenance des trois ruisseaux. La démarche s'inscrit à la suite des études de l'équipe du Dr Biron de l'Université Concordia ciblée sur les sources, causes et éléments de solution à la sédimentation des canaux de Saint-Zotique (Amyot et Biron, 2016; Lessard et Biron, 2017). Suivant la caractérisation des bancs de sédiments accumulés dans les canaux, l'équipe de Concordia en identifiait plusieurs sources, dont les contributions des ruisseaux se déversant directement dans les canaux, depuis les petits bassins versants à vocation agricole en amont. Les charges de la rivière Beaudette se déversant au fleuve à deux kilomètres à l'amont et l'érosion de la plage de Saint-Zotique étaient aussi identifiés comme sources potentielles à l'envasement des canaux.

L'étude commandée à l'IRDA avait pour principal objectif de mesurer les flux de sédiments et de nutriments (azote et phosphore) apportés dans les canaux par les trois principaux ruisseaux affluents de la municipalité. De façon complémentaire aux mesures en ruisseaux, la vulnérabilité du territoire des trois petits bassins versants agricoles à l'exportation de sédiments et de phosphore a été projetée suivant une application de méta-modèle GéODEP. Dans une perspective d'accompagnement agroenvironnementale des entreprises agricoles de la région à l'étude, l'outil développé permet également de projeter l'atténuation des pertes de sédiments et de phosphore des champs suivant différents scénarios de régulation des sols et des cultures, et d'aménagement des terres.

2 VOLET I : ÉTUDE HYDROMÉTRIQUE

Cette première section du rapport présente les résultats du suivi hydrométrique réalisé pour la période de juillet 2016 à juin 2019 aux exutoires de ruisseaux du Grand Marais, Dix-huit Arpents et Six Arpents. 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, par l'équipe Bassins versants de l'IRDA. Des informations additionnelles sur ces études sont disponibles sur le site web de l'IRDA (IRDA, 2020).

Dans une perspective d'appuyer les actions de la coalition d'intervenants de la région d'étude dans leurs démarches de prévention de l'envasement des canaux de saint-Zotique, les objectifs du volet d'étude hydrométrique étaient les suivants :

- Décrire les réponses hydrologiques des trois ruisseaux à l'étude et quantifier leurs flux respectifs de sédiments et de nutriments (P et azote);
- Interpréter les principaux facteurs déterminant des exportations de sédiments et de nutriments en lien avec le régime hydrique, les saisons, les propriétés du paysage et des sols, de même que l'occupation du territoire.
- Appuyer les partenaires du projet dans la planification des actions agroenvironnementales.
- Fournir une base de validation des projections du modèle GÉODEP mis à profit dans le cadre de cette étude.

2.1 MÉTHODOLOGIE

Le dispositif d'étude des trois ruisseaux 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 complémentées par des prélèvements d'échantillons d'eau, principalement lors des crues des cours d'eau, qui sont acheminés au laboratoire pour en déterminer les teneurs en sédiments et nutriments. Le traitement des données de débit et du signal géochimique de l'eau, couplé à celui des résultats de dosages au laboratoire des échantillons prélevés ponctuellement dans les cours d'eau a permis de décrire en continu les débits et les flux de sédiments et de nutriments pour la durée de la période de suivi hydrométrique (juillet 2016 à mai 2019).

2.1.1 Description des sites d'étude

La localisation des stations hydrométriques, de même que la délimitation de leurs bassins respectifs, sont illustrées en Figure 1. Les stations du Grand Marais et du Dix-huit Arpents sont localisées en amont des ponceaux de la route 338 (rue principale), tout près de la confluence des ruisseaux avec les canaux affluents au fleuve. La station du Six Arpents est située immédiatement en aval de la station de pompage, juste en amont du ponceau sous l'autoroute 20 (Figure 2.1). Un aperçu visuel des stations est présenté en Figure 2. L'occupation du territoire de l'ensemble des trois bassins versants est pour sa part illustrée en Figure 3 et rapportée par classe d'occupation au Tableau 1.

Dans l'ensemble, l'occupation agricole domine les trois bassins versants à l'étude, avec 74% de la superficie totale dédiée aux cultures. Le bassin du ruisseau du Dix-huit Arpents se distingue cependant par une occupation forestière relativement plus importante (36 % de sa superficie totale) que pour le Grand Marais et les Six Arpents, avec des proportions respectives de 13 % et 19 % de leur superficie occupée par la forêt. Le portrait des cultures demeure sensiblement le même pour les trois bassins à l'étude, reflétant la vocation céréalière des entreprises agricoles de la région d'étude. Suivant le portrait des cultures assurées de la Financière agricole du Québec (2019), complémenté par celui de la carte écoforestière du MFFQ (2016), la culture du maïs grain occupe la plus large part des champs cultivés (54%, 1,380 ha). Les cultures de soja, de prairie et de céréales à paille occupent respectivement 16%, 9% et 8% de la superficie totale en culture. En ce qui a trait aux occupations non agricoles du territoire, la forêt couvre globalement 22% de la superficie de la région d'étude (766 ha). Les superficies des autres occupations sont présentées au Tableau 1. Une présentation plus détaillée des pratiques agricoles et des propriétés des sols et du paysage est offerte en deuxième section du rapport, dédiée à la modélisation de la vulnérabilité du bassin versant aux exportations de sédiments et de phosphore.

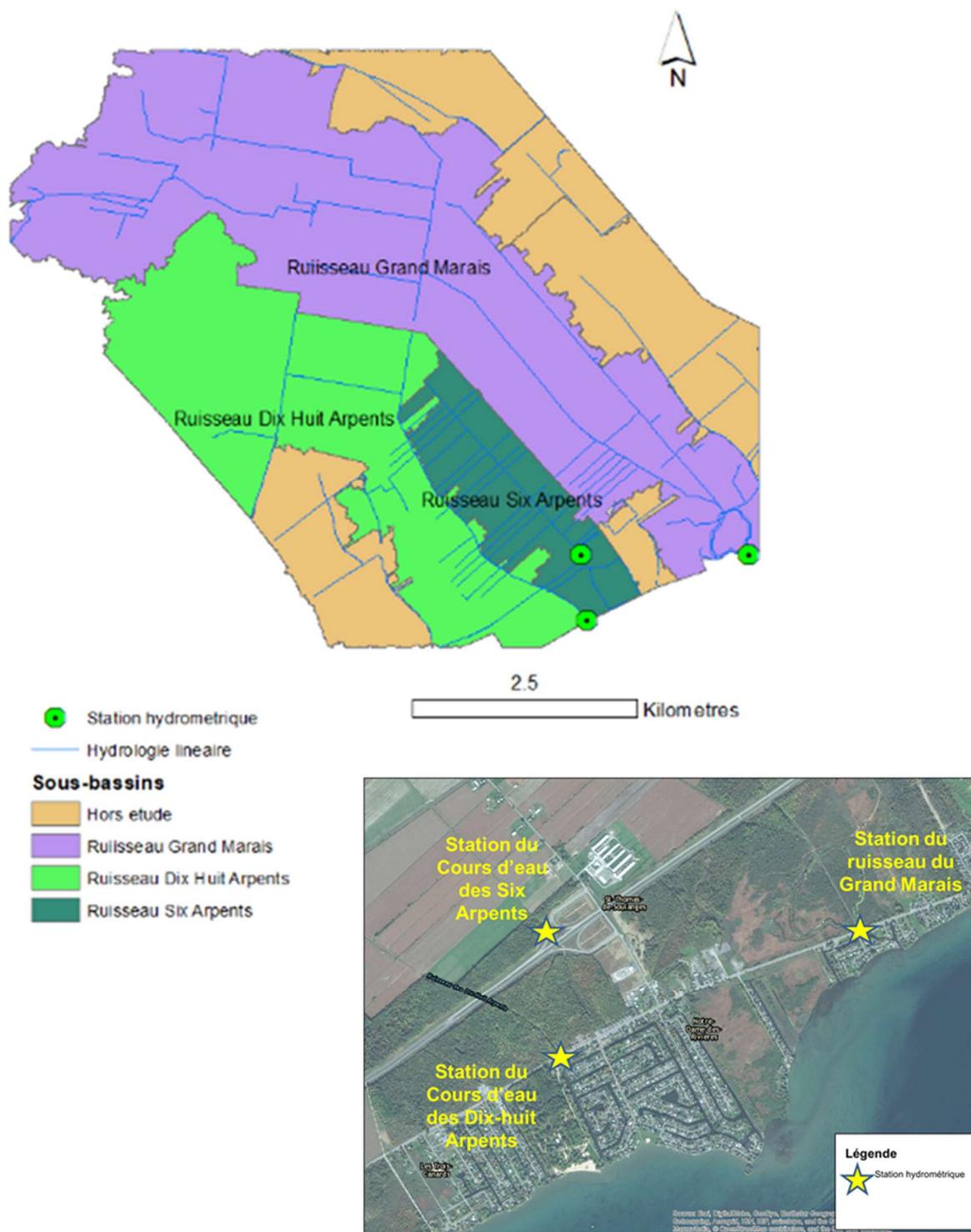


Figure 1. Localisation des stations et des sous-bassins versants des stations hydrométriques des ruisseaux du Grand Marais, des Six Arpents et des Dix-huit Arpents.



Figure 2. Aperçu des sites des stations Grand Marais (a), Dix-huit Arpents (b) et Six Arpents (c).

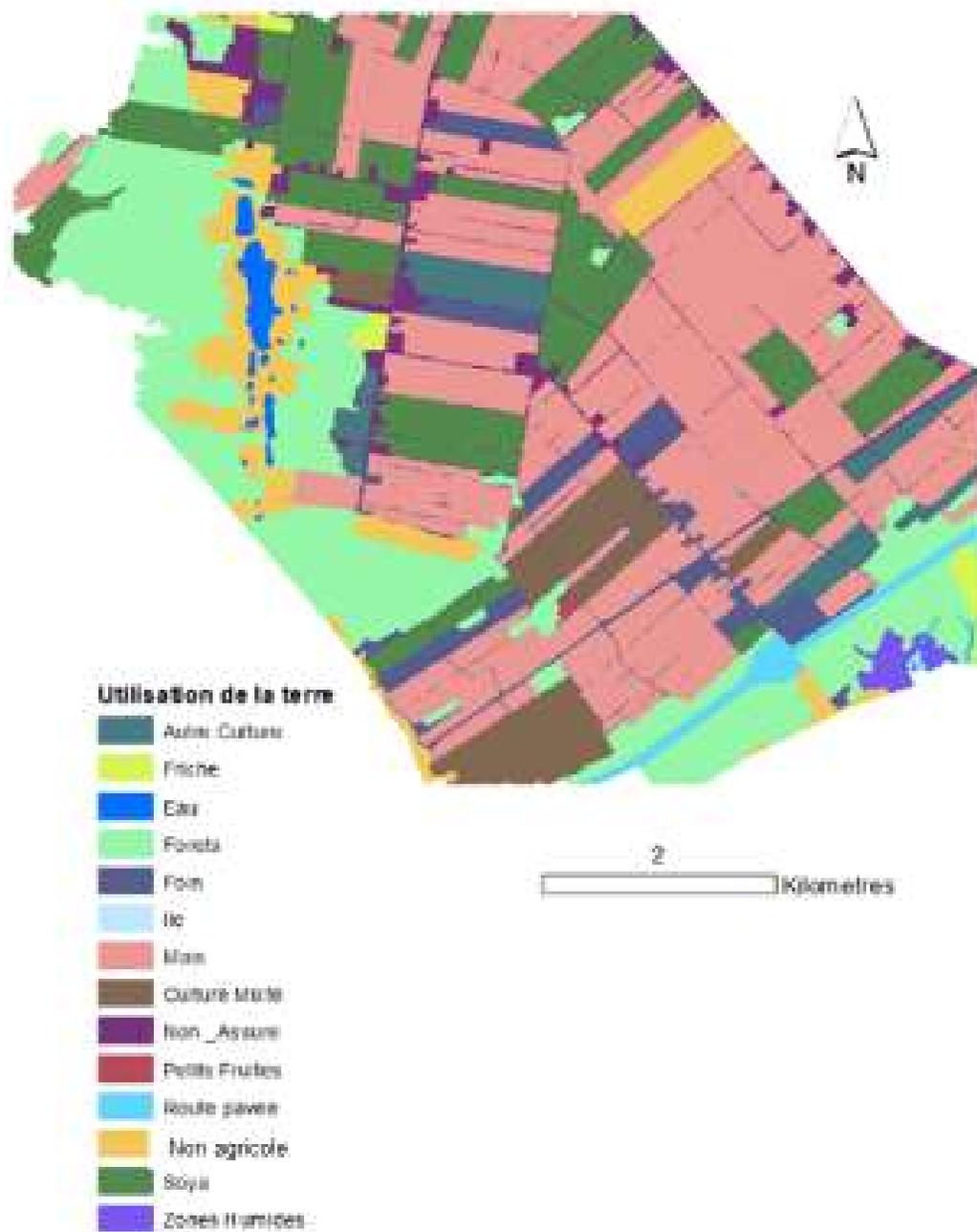


Figure 3. Occupation du territoire des bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique.

Tableau 1. Occupation du territoire des bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique.

	Superficie (ha)
Céréales à paille	291
Maïs grain	1 380
Soya	558
Prairie	306
Total agricole	2 535
Forêts	766
Friches	23
Routes pavées	44
Résidentiel	232
Eau	35
Milieus humides	22
Total non agricole	1 122
Total - Territoire	3 657

2.1.2 Aménagement et opération des stations hydrométriques

Les dispositifs et protocoles mis en place à l'été 2016 sont spécifiquement adaptés à la mesure des débits et des flux de sédiments et de nutriments. Les stations hydrométriques sont composées de plusieurs instruments localisés aux abords et dans le cours d'eau (Tableau 2) qui enregistrent la hauteur d'eau, la vitesse du courant, de même que la température et le signal géochimique de l'eau (turbidité et conductivité électrique). 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 2. Description des instruments en place aux stations hydrométriques.

Équipements de mesure	Station Grand Marais	Station Dix-huit Arpents	Station Six Arpents
Sonde multi-paramètres (YSI) (turbidité, conductivité électrique et température)	X	X	X
Sonde barométrique (HOBO) (hauteur de la colonne d'eau)	X	X	
Sondes barométrique et acoustique (ISCO) (hauteur de la colonne d'eau et vitesse)	X	X	X

Les sondes de mesure de la pression (hauteur de la colonne d'eau) et acoustiques (mesure de la vitesse du courant) sont installées au centre de la section d'écoulement alors que les sondes multi-paramètres (mesures de turbidité, conductivité électrique et température), munies d'un dispositif de flottaison, sont insérées dans des cylindres de plastique perforés et installées près de la rive. La station du Grand Marais fait cependant exception, alors que la sonde multi-paramètres est plutôt immergée sous le ponceau de la piste cyclable (Figure 4). Les dispositifs d'alimentation solaire et électroniques d'enregistrement des mesures sont installés sur la rive. Les sondes multi-paramètres ont été retirées du cours d'eau avant la mise en place du couvert de glace (début décembre) et réinstallées à la fin de l'hiver (début-mars). En période hivernale, l'équipe terrain brise la glace afin de procéder aux jaugeages et échantillonnages ponctuels (Figure 5).



Figure 4. Installation des équipements à la station du ruisseau du Grand Marais.



Figure 5. Jaugeage du débit aux stations Dix-huit Arpents et Grand Marais à l'hiver 2018.

Chaque station hydrométrique fait l'objet d'un entretien selon un intervalle moyen de quatre à six semaines. L'équipe de terrain 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. Un moulinet à godet ou hydrométrique (figure 6) a été utilisé pour les mesures, à raison d'un minimum de 15 mesures par section d'écoulement, d'une berge à l'autre, suivant un espacement régulier. Au cours de la période d'étude, 24 campagnes de mesures de débit ont été effectuées sur chacun des cours d'eau Grand Marais et Dix-huit Arpents. Les mesures de débits à la station des Six Arpents ont pour leur part été dictées par l'opération de la pompe en amont, typiquement lors des épisodes hydrologiques de forte intensité.

A deux reprises, aux hivers 2018 et 2019, les stations hydrométriques des ruisseaux du Dix-huit Arpents et du Grand Marais ont été vandalisées et quelques composantes volées (batteries marines et panneaux solaires). Les équipements détruits, d'une valeur de plus de 30,000\$ ont été remplacés aux frais de l'équipe de projet.

2.1.3 Campagnes d'échantillonnage des cours d'eau

À chaque visite d'entretien des stations hydrométriques par l'équipe de l'IRDA, un échantillon d'eau est prélevé et rapporté au laboratoire pour l'analyse de sa qualité. L'équipe de la municipalité a pour sa part coordonné les campagnes 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. Deux autres campagnes étaient réalisées dans les 36 heures suivant ce même pic, séparées minimalement par quatre heures entre chacune d'elle. Au cours du projet, les échantillonnages ont été répartis à travers chaque saison afin d'obtenir un portrait de la variabilité saisonnière de la qualité de l'eau.



Figure 6. Mesures du débit instantané, à l'aide du moulinet hydrométrique, à la station Dix-huit Arpens.

Au total, 193 échantillons ont été dosés pour la détermination des paramètres physico-chimiques au laboratoire de l'IRDA. La figure 7 illustre la distribution des campagnes d'échantillonnage et des mesures du débit par rapport aux débits journaliers estimés des trois cours d'eau à l'étude. Dans l'ensemble, la comparaison des débits journaliers estimés en continu avec les des débits échantillonnés illustre une excellente couverture des crues des ruisseaux, alors que celles-ci contribuent à la majeure partie des charges de sédiments et de nutriments aux canaux. Lors des campagnes, les échantillons ont été prélevés en utilisant dans des bouteilles de 500 ml montées sur une perche télescopique, puis ensuite conservées au froid jusqu'au dosage au laboratoire. La bouteille était rincée une première fois avec l'eau de surface, puis replongée 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 d'analyse agroenvironnementale 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 en ses composantes totale, dissoute et particulaire a également été déterminée en laboratoire. (Murphy et Riley, 1962, Greenberg et al., 1992c).

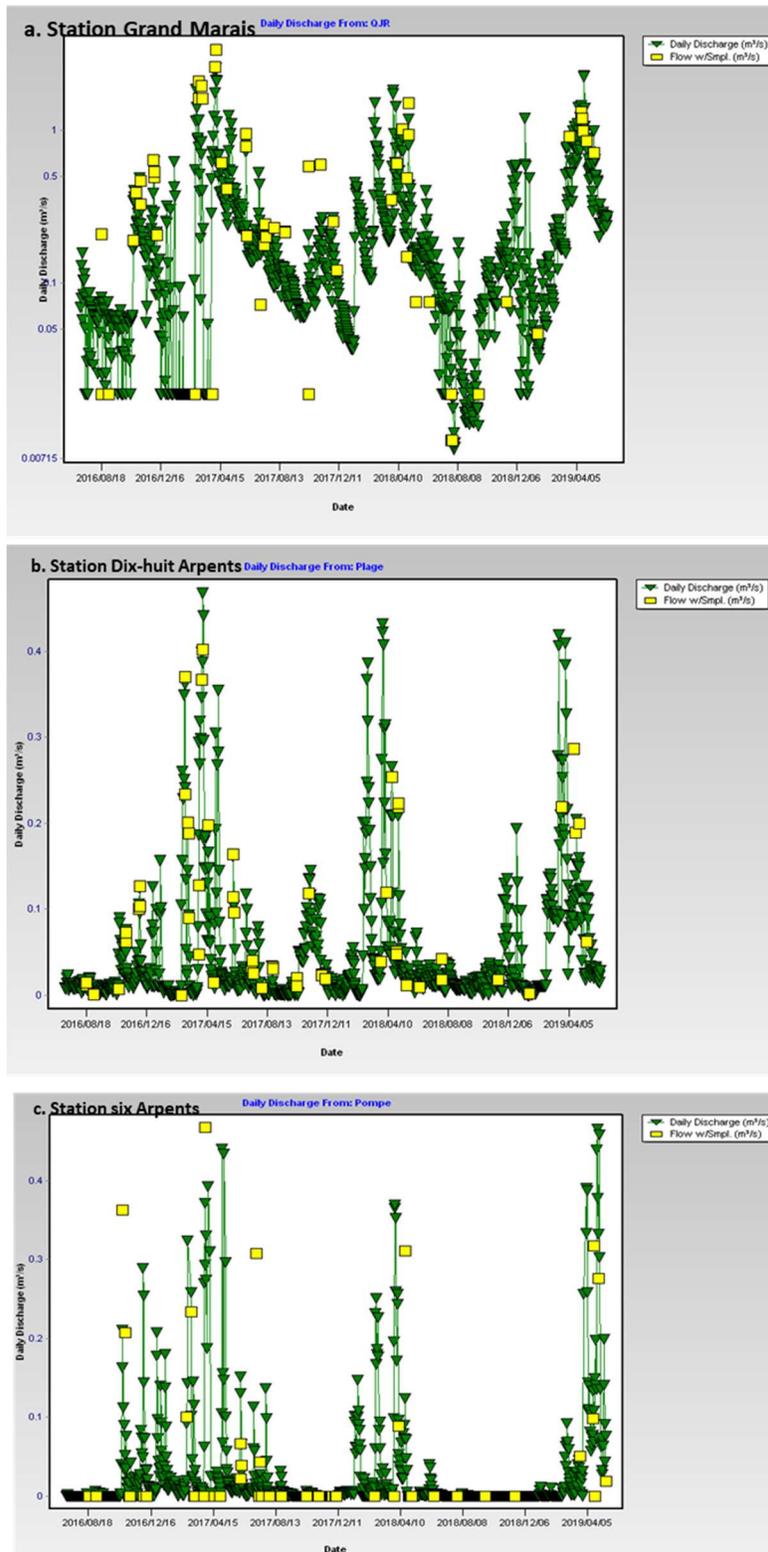


Figure 7. Distribution dans le temps des débits journaliers moyens et des débits observés au moment des échantillonnages aux stations Grand Marais (a), Dix-huit Arpents (b) et Six Arpents (c).

2.2 DÉPOUILLEMENT DES DONNÉES HYDROMÉTRIQUES

Les données brutes recueillies sur le terrain ont permis 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);
- L'évolution des signaux de conductivité électrique de l'eau, témoignant de la séparation des écoulements en ses composantes de surface et de souterrain;
- L'évolution en continu des charges de matières en suspension (MES) dérivée du signal de turbidité;
- L'estimation des charges de phosphore et d'azote.

Cette section présente les résultats du suivi hydrologique des trois ruisseaux à l'étude pour la période d'octobre 2016 à mai 2019, incluant les débits des ruisseaux et leurs flux respectifs de sédiments de phosphore, de nitrates et de calcium.

2.2.1 Débits des ruisseaux

Les débits instantanés (aux 15 minutes) et journaliers moyens ont été estimés sur la base des données brutes de hauteurs et de vitesses colligées par les instruments sur le terrain. L'ensemble des mesures ponctuelles du débit des cours d'eau réalisées en cours d'année a permis d'établir les courbes de tarage *hauteur : vitesse : débit* spécifiques à chaque station. Le traitement des données a dû composer avec les influences de plusieurs facteurs déterminant des débits, dont les principaux sont en lien avec la transformation des parcours naturel des eaux lors de l'aménagement de l'autoroute 20. Le dépouillement minutieux des données au cours de la période d'étude a permis de rendre compte des effets du débordement de la zone d'inondation du ruisseau Delisle dans les bassins du Grand Marais et des Six Arpents, des influences du couvert de glace en conditions hivernales, du refoulement du débit dû à la végétation abondante en été, du refoulement au fleuve (Grand marais) et enfin de l'intermittence de l'opération de la pompe aux Six Arpents.

Pour les besoins des comparaisons entre les bassins à l'étude, les estimations de débits sont traduites en hauteur spécifique d'eau exportée (mm) pour une période de temps donnée. Notons ici que les estimations de débits à la station du Grand Marais ont été dérivées essentiellement de la vitesse du courant enregistrée par la sonde acoustique, compte tenu que la section d'écoulement était constamment submergée, offrant une aire de section d'écoulement constante. Le débit à la station du Six Arpents était pour sa part déterminé par l'opération de la station de pompage en amont. L'estimation du débit a mis à profit les observations de vitesse du courant et de hauteur d'eau à l'entrée du ponceau sous l'autoroute 20. A la station du Dix-huit Arpents, la relation hauteur-débit s'est avérée plutôt stable, permettant un calage hauteur-débit de la section d'écoulement.

Les précipitations et hauteurs d'eau totales et moyennes annuelles exportées des ruisseaux du Grand Marais, Dix-Huit Arpents et Six Arpents sont présentées au Tableau 3. Le ruisseau du Grand Marais se distingue à la hausse avec une hauteur spécifique annuelle moyenne de 426 mm par an. Cette hauteur d'eau relativement plus importante que les autres ruisseaux de la région d'étude est redevable au refoulement du débit du ruisseau Léger. Celui-ci génère en effet une importante zone d'inondation qui s'étend dans le bassin versant du Grand Marais, jusqu'au bassin du Six Arpents voisin, telle que décrite par Lessard (2017) Les pentes négatives du ruisseau Léger sont en fait héritées de sa dérivation vers le ruisseau Delisle, lors de la construction de l'autoroute 20. La figure 8 illustre l'ancien parcours du ruisseau Léger et la zone d'inondation découlant de cette dérivation.

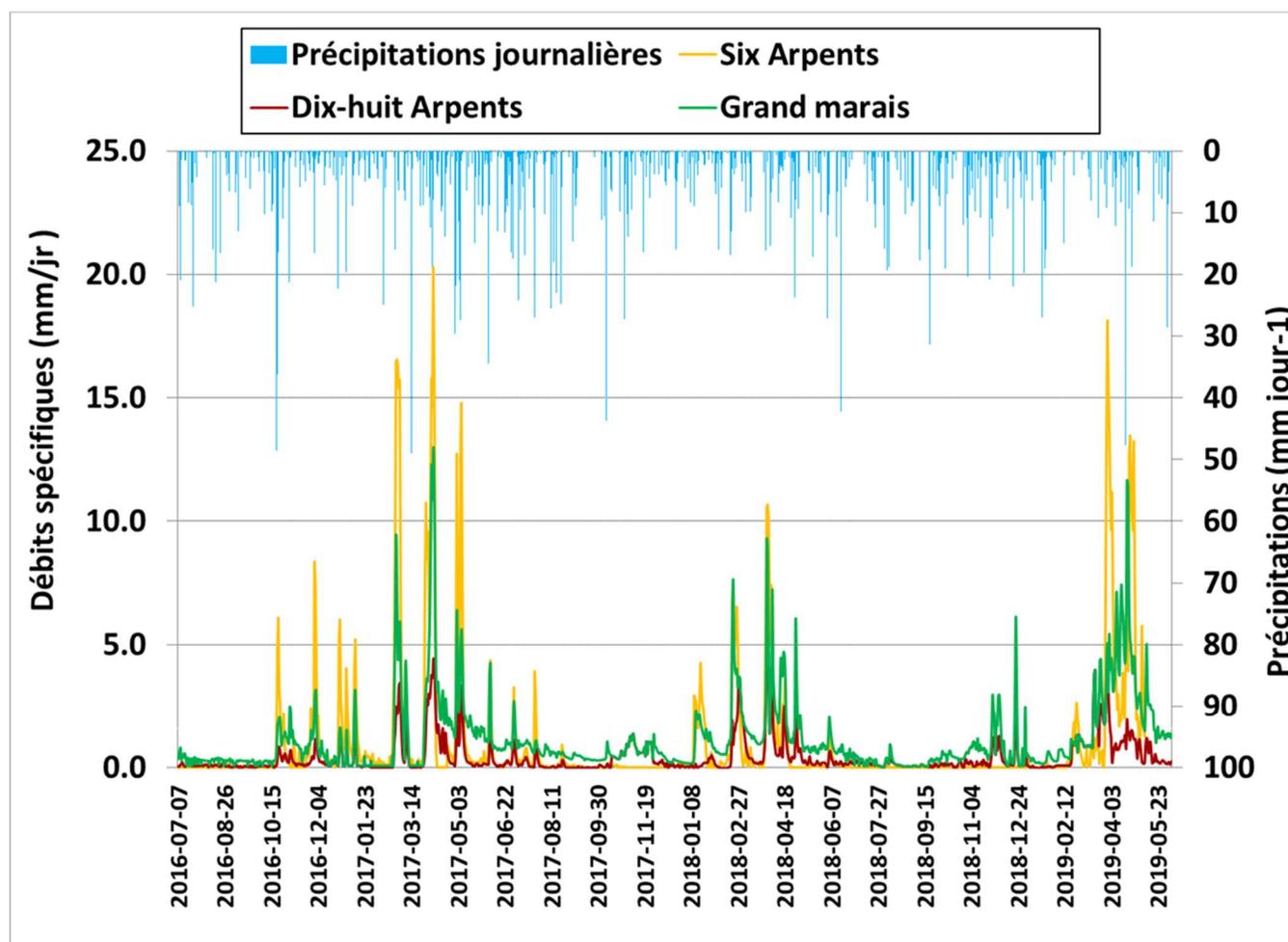


Figure 8. Série chronologique des débits spécifiques et des précipitations journalières observés aux trois stations hydrométriques pour la période de suivi de juillet 2016 à mai 2019.

La hauteur d'eau annuelle du ruisseau des Six Arpents est pour sa part estimée à 352 mm, soit près du double de celle des Dix-huit Arpents, estimée plutôt dans l'ordre de 159 mm par année. Une telle différence surprend, a priori, pour des bassins voisins. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à cet écart, en lien notamment avec les modifications importantes apportées au réseau hydrographique naturel de la zone d'étude. Rappelons que le ruisseau des Six Arpents est drainé artificiellement par pompage à son exutoire. Aussi, le relief très plat de la zone d'étude n'exclue pas que la présence d'embâcles, lors des crues printanières, induise des transferts de volume d'eau entre les trois bassins des ruisseaux. L'examen des débits de crue à la station des Dix-huit arpents (Figure 9) suggère cette hypothèse, alors que la hausse significative du signal de turbidité n'est pas en phase avec le débit. L'occupation forestière relativement plus importante de ce bassin (36%) favorise également le laminage des crues printanières, qui constituent une large part du volume d'eau annuel exporté.

La distribution temporelle des débits journaliers mesurés aux trois stations est illustrée en figure 10. Aux trois stations, les distributions témoignent des fortes contributions des crues printanières de 2017, 2018 et 2019 aux débits annuels des cours d'eau. Le refoulement du ruisseau Léger influence principalement le cours du ruisseau du Grand Marais, et dans une moindre mesure le ruisseau des Six Arpents, tel que suggéré par la cartographie de la zone d'inondation (Figure 10). Les débits de pointe du ruisseau du Six Arpents se distinguent systématiquement à la hausse, suggérant une réponse relativement plus vive du ruissellement de surface aux précipitations. En période estivale, le débit du cours devient cependant intermittent. Le cours du ruisseau du Dix-huit Arpents, aussi intermittent, se distingue par un débit spécifique constamment inférieur aux autres ruisseaux. L'hydrogramme du Grand Marais se distingue plutôt par un écoulement de base plus soutenue, l'année durant, reflétant la rétention de l'eau dans le milieu humide et le laminage du débit du ruisseau.

Tableau 3. Précipitations et hauteurs d'eau totales et moyennes annuelles exportées des ruisseaux du Grand Marais, Dix-Huit Arpents et Six Arpents.

Station	Hauteur d'eau (mm)	
	Période d'étude ¹	Moyenne annuelle
Grand Marais	1 246	426
Dix-huit Arpents	465	159
Six Arpents	1 000	352
Précipitations	3 106	1 063
1: Grand Marais et Dix-huit Arpents: 1066 jours; Six Arpents: 1038 jours		

2.2.2 Signatures géochimiques

L'importance relative du cheminement des eaux en surface (ruissellement) ou souterrain (drainage artificiel et résurgence de la nappe au ruisseau) est également illustrée par le signal de conductivité électrique de l'eau enregistrée en continu par les sondes multi-paramètres aux trois stations à l'étude. Cette variation du signal témoigne du principe que l'eau qui s'infiltre dans le sol se charge en éléments minéraux et développe alors une conductivité électrique plus élevée que l'eau qui a rejoint rapidement le ruisseau par ruissellement de surface. La figure 9 compare, à titre d'exemple, les observations de la crue du 5 au 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, reflétant un régime d'écoulement à prédominance souterraine, les conductivités électriques de l'eau sont relativement élevées. Avec la montée des eaux, la conductivité diminue rapidement dans les trois ruisseaux, reflétant l'apport croissant du ruissellement de surface. A l'inverse, les signaux de turbidité augmentent, témoignant des processus d'érosion et de transport de sédiments à l'œuvre dans les bassins versants des ruisseaux. 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 qui atteint l'exutoire du ruisseau par les voies souterraines.

La comparaison des évolutions dans le temps des débits et des signaux de turbidité et de conductivité au cours de l'évènement du 5 au 7 avril 2017 met en relief des différences dans les signatures géochimiques des cours d'eau à l'étude. Bien que les trois ruisseaux témoignent de baisses de conductivité et de hausses de turbidité relativement synchrones, le pic de turbidité à la station du Dix-huit Arpents est deux fois moins élevé (200 NTU) que les deux autres ruisseaux (500+ NTU). La hausse du débit y est également marginale, ce qui semble indiquer un débordement du ruisseau dans le bassin versant voisin, encouragé par la nature très plane du paysage et la formation d'embâcles. Un deuxième pic de turbidité, en retard par rapport au débit de pointe, suggère par ailleurs une mobilisation tardive des sédiments suivant une période de rétention dans le bassin.

A la station des Six Arpents, le signal saccadé du débit reflète les départs et arrêts fréquents de la pompe. La chute très importante de la conductivité électrique témoigne par ailleurs d'une contribution importante du ruissellement de surface au débit total du cours d'eau. Ce constat soulève l'hypothèse d'une susceptibilité relativement plus importante de ce bassin à l'émission de ruissellement de surface, reflétant la nature des sols (classe de drainage) et possiblement l'effet de son évacuation artificielle sur le maintien d'une nappe superficielle élevée. Aussi, tel que mentionné précédemment, le ruisseau serait également affecté par la zone d'inondation du ruisseau Léger.

Au Grand Marais, la forte augmentation et le maintien d'un débit élevé durant la crue du 7 avril 2018 témoigne manifestement de l'inondation de sa portion aval, en lien avec le refoulement de l'écoulement du ruisseau Léger. Le signal de turbidité relativement brouillé traduit vraisemblablement l'influence de nombreux débris accumulés à l'amont du ponceau (en aval de la station) dont la section d'écoulement demeure complètement submergée (Figure 4).

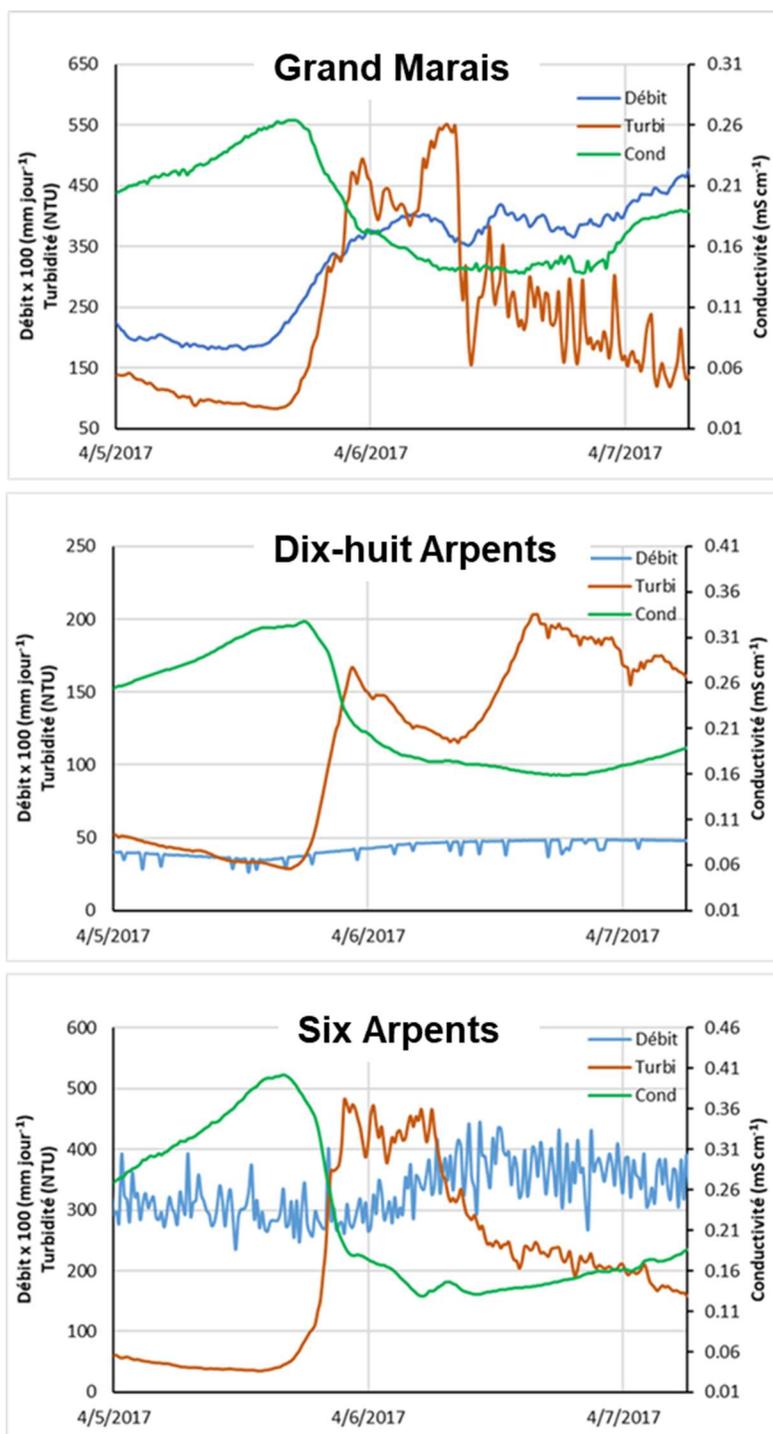


Figure 9. Variation du débit, de la turbidité et de la conductivité au pas de temps de 15 minutes pour la crue du 5 au 7 avril 2017 observée aux trois stations hydrométriques.

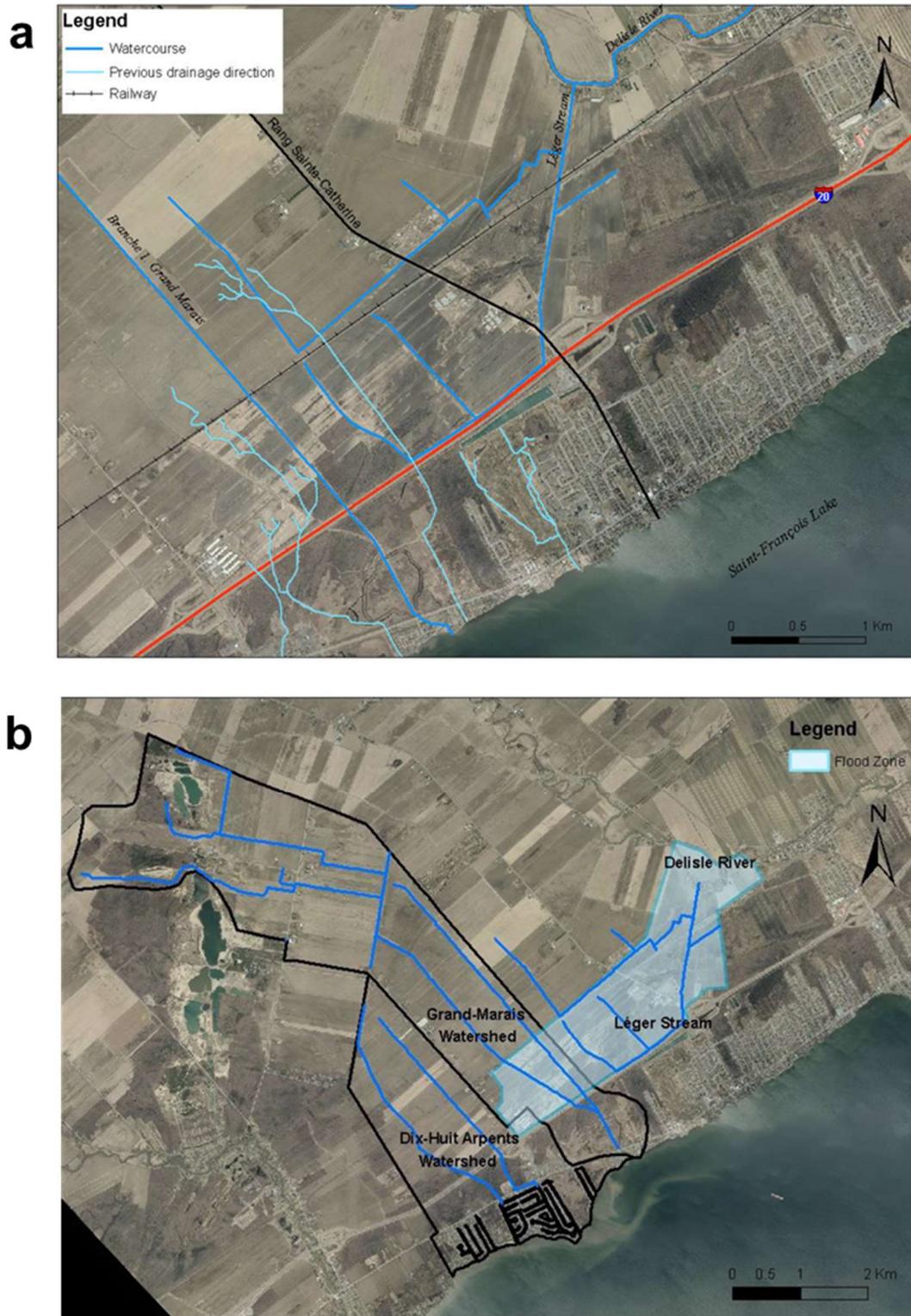


Figure 10. Ancien et nouveau parcours du ruisseau Léger (a) et délimitation de sa zone d'inondation actuelle (Adapté de Lessard et Biron, 2017).

2.2.3 Flux de sédiments et de nutriments

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 d'échantillons d'eau et de leur dosage en laboratoire. Par définition, le flux d'un élément donné est le produit instantané du débit et de sa concentration. L'estimation des flux de nutriments consiste alors à développer des modèles statistiques (régressions linéaires) exprimant l'évolution de la concentration d'un élément donné (P total, nitrates, etc.) en fonction du débit du cours d'eau. La relation développée est ensuite mise à profit dans les calculs d'interpolation des flux entre les jours où des valeurs observées sont disponibles. L'incertitude de cette interpolation est estimée suivant une approche de validation croisée (*Jack knife*) où la capacité du modèle à exprimer la valeur de chacune des observations, retirées une à une, est évaluée. Pour les bassins de la taille de la présente étude, le critère de qualité de l'ajustement du modèle d'estimation des flux (CV) est fixé à 0,20 (Walker, 1998).

Les figures 10 à 12 illustrent la distribution des observations instantanées de concentrations en calcium (Ca), en matières en suspension (MES), en phosphore total (P Total) et en nitrates (NO₃) pour les stations hydrométriques du Grand Marais, Dix-huit Arpents et Dix Arpents, 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 différences importantes entre les bassins versants. Deux facteurs principaux expliquent cette variabilité, soit les conditions hydrologiques à l'œuvre lors du prélèvement d'échantillons (débit, répartition surface/souterraine, montée vs décrue) et la période de l'année (saisonnalité).

Les teneurs du cours d'eau en Ca, MES et P sont pour leur part fortement influencées par la hausse du débit. Les concentrations en MES et P atteignent ainsi leur niveau maximal lors des crues, à forte composante de ruissellement de surface. À l'inverse, le taux de Ca est alors à son plus bas. Suivant la crue, alors que le débit du ruisseau retourne à son écoulement de base, la résurgence de la nappe superficielle enrichit graduellement le cours d'eau sels minéraux. En ce qui a trait aux nitrates, essentiellement transportés par les écoulements souterrains sous forme soluble, le contrôle est plutôt de nature saisonnière. Les apports d'intrants et les cycles naturels de mobilisation, de transformation et de prélèvement des nutriments par les plantes déterminent la quantité d'azote disponible à l'exportation.

Les figures 13 à 15 illustrent les résultats de la modélisation statistique des flux journaliers de sédiments et nutriments aux trois ruisseaux au cours de la période d'étude, soit de juillet 2016 à mai 2019. Le tableau 4 présente enfin la sommation des flux (charges) de sédiments et nutriments à chaque station. Malgré une grande dispersion des valeurs de concentrations observées dans les échantillons prélevés lors des crues des cours d'eau, pour les différents paramètres de qualité de l'eau, l'ajustement des modèles de calcul des flux est estimé satisfaisant, rencontrant le critère de coefficient de variation croisée de l'ordre de 20 %. Les résultats sont commentés ci-après pour chacun des paramètres de qualité à l'étude.

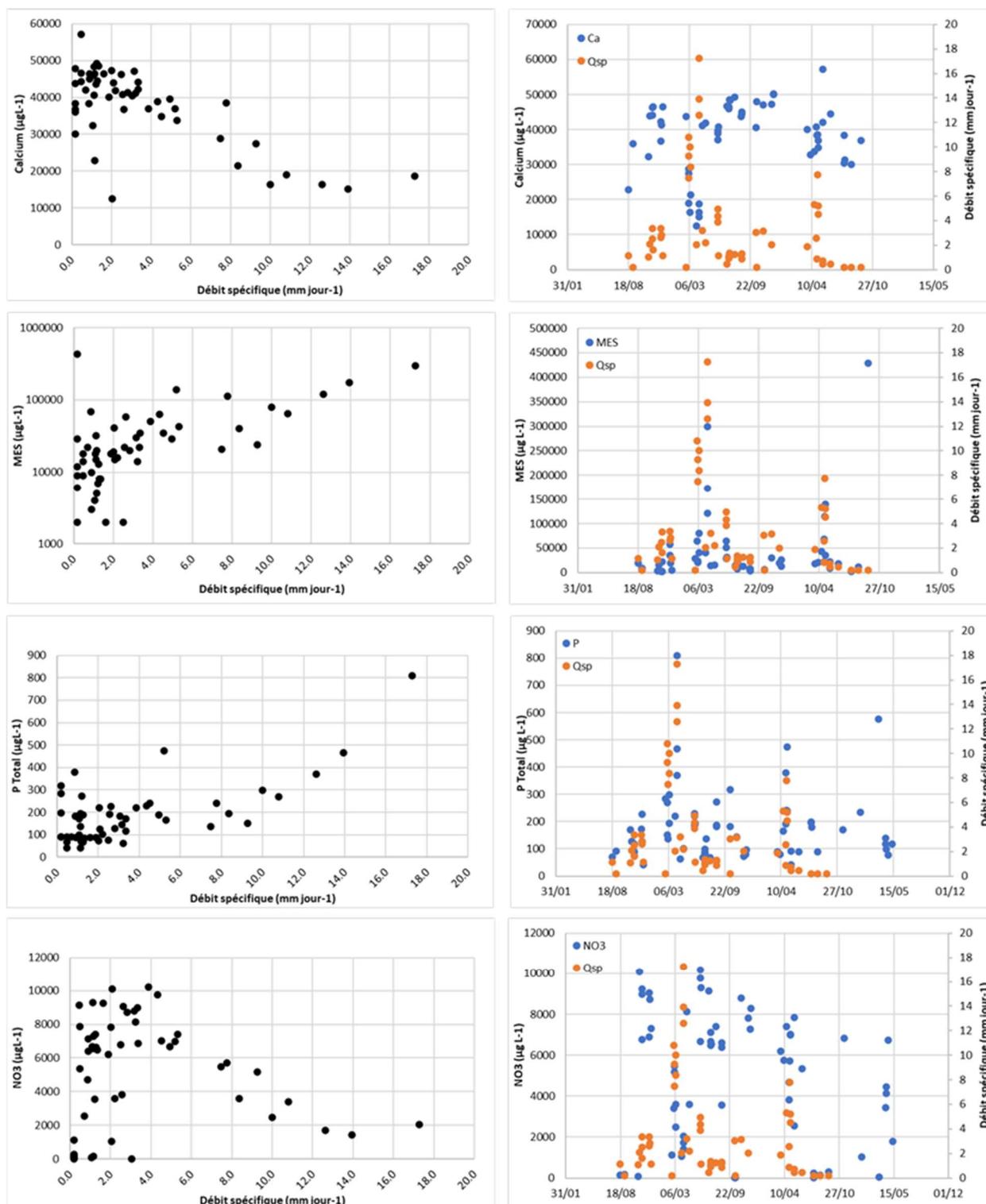


Figure 11. Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO₃) en fonction du débit spécifique (Qsp) et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique du Grand Marais.

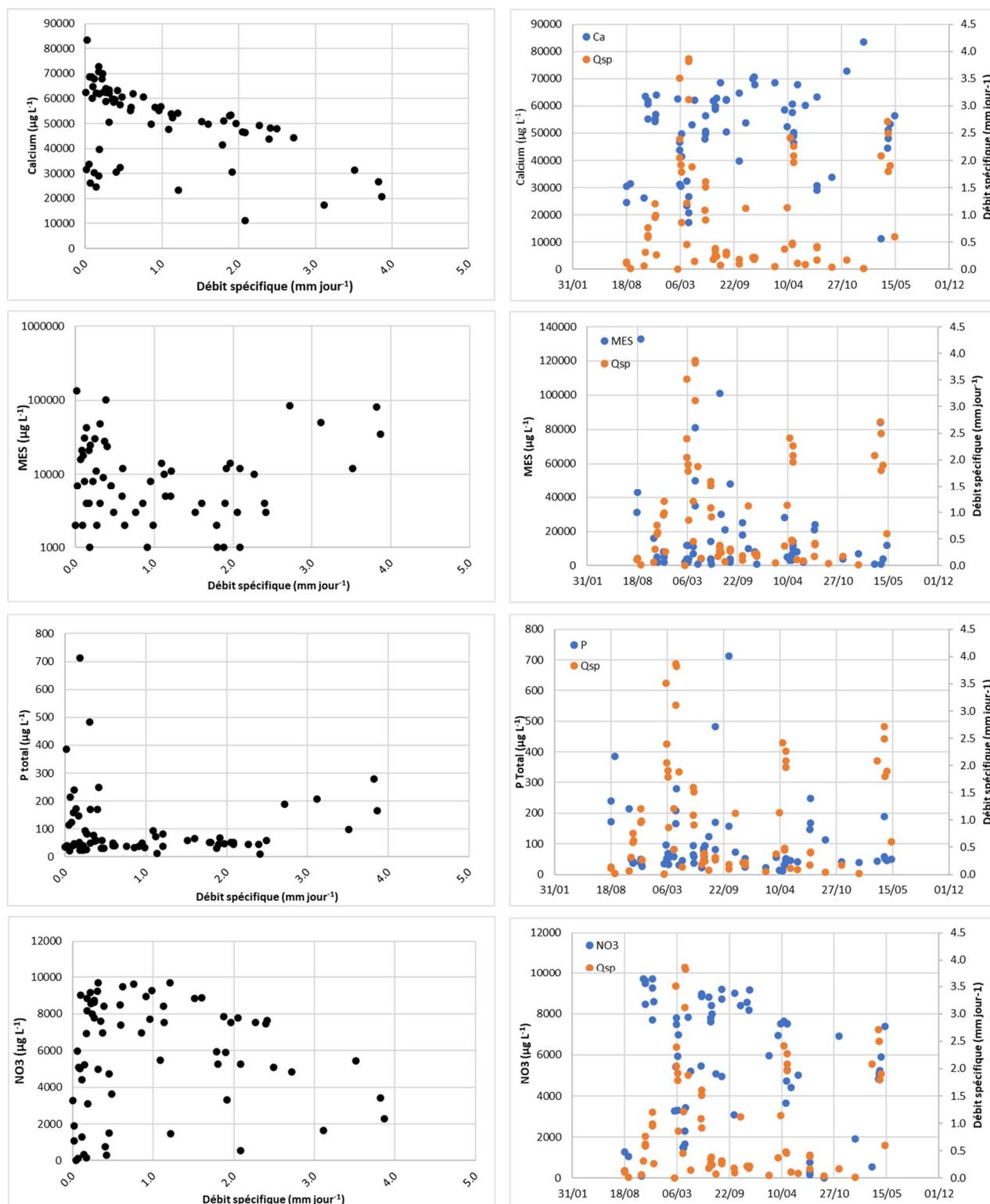


Figure 12. Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO₃) en fonction du débit spécifique (Qsp) et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique du ruisseau Dix-huit Arpents.

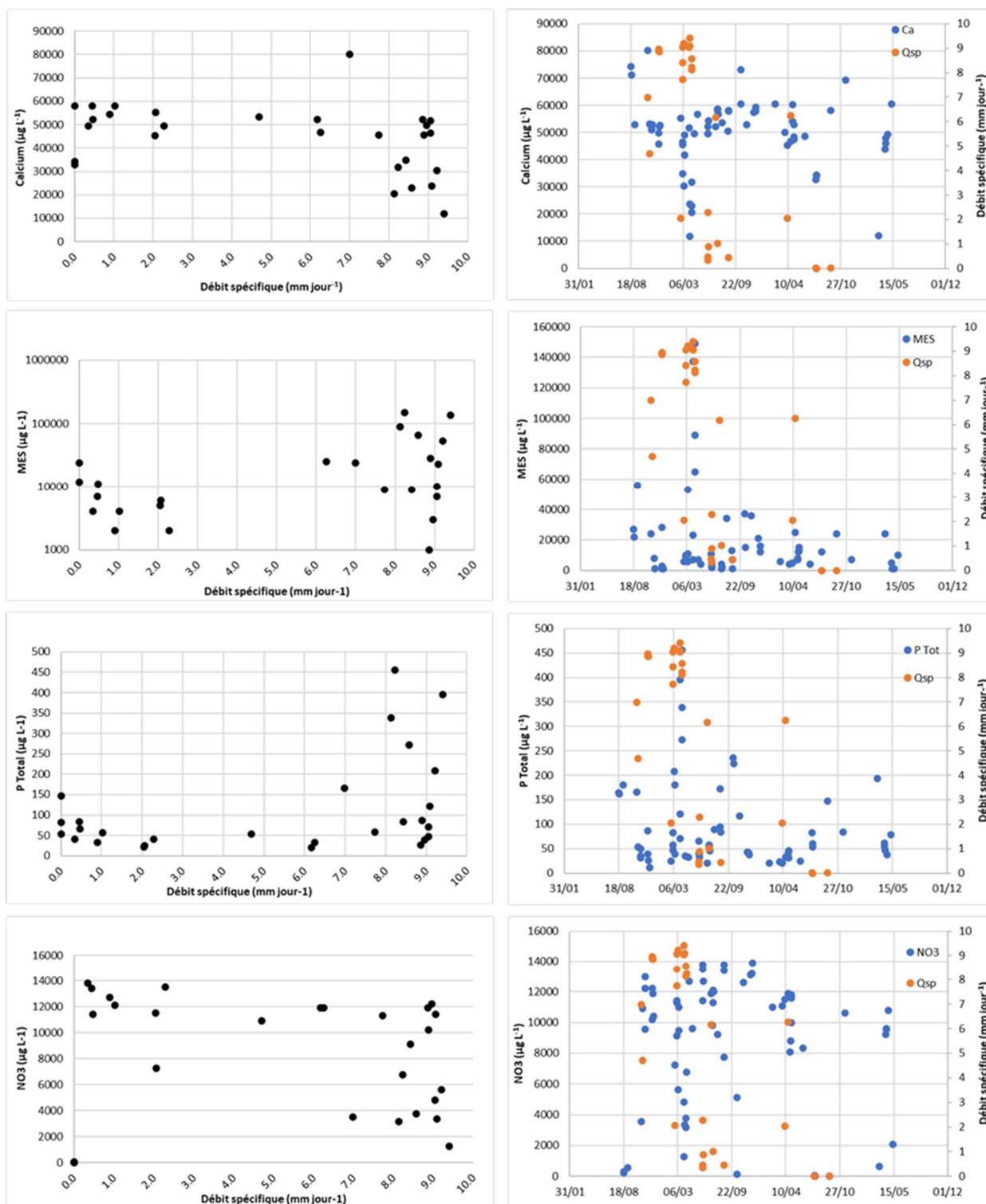


Figure 13. Distribution des concentrations observées en calcium (Ca), matières en suspension (MES), phosphore total (P total) et nitrates (NO₃) en fonction du débit spécifique (Qsp) et de la date d'échantillonnage à la station hydrométrique de la rivière Six Arpents.

CALCIUM

La distribution des concentrations en calcium (Ca) aux trois stations hydrométriques est fortement influencée par le débit, tel qu'illustrée aux figures 10 à 12. Les concentrations en Ca des ruisseaux sont à leur maxima en condition d'étiage, alors que les minéraux entraînés depuis les couches profondes du sol enrichissent le cours d'eau. Les concentrations les plus basses en Ca des ruisseaux témoignent à l'inverse de l'apport de ruissellement de surface, moins chargé en sels. Pour les trois ruisseaux à l'étude, la concentration en Ca varie ainsi de façon très importante, alors que les ruisseaux passent d'un régime d'écoulement de base à celui de crue.

En régime d'écoulement de base, le taux de Ca se situe dans l'ordre de 60 mg Ca/L, aux trois ruisseaux, reflétant la nature calcaire du sous-sol et l'amendement des terres en chaux afin de maintenir un pH du sol optimal pour la production agricole. Les teneurs en Ca chutent à leur niveaux minimum, dans l'ordre de 10 mg/L, lors des plus forte crues à forte composante de ruissellement de surface. Les observations de teneur en Ca des ruisseaux du Grand Marais et des Dix-huit Arpents demeurent particulièrement bien définies par l'évolution des débits des ruisseaux (Figures 10 et 11). C'est aussi le cas pour les taux de MES et P, influencés par l'intensité du ruissellement de surface. Par contre, la distribution des teneurs en ces éléments apparaît moins structurée au ruisseau du Six Arpents, en raison de la discontinuité du débit et du processus de mixage des eaux dans le bassin en aval de la station de pompage.

Tableau 4. Concentrations (conc) moyennes pondérées pour le débit et charges annuelles et charges annuelles spécifiques (365 jrs, base ha) de calcium, de matières en suspension, d'azote et de phosphore estimées aux stations hydrométriques Grand Marais, Dix-huit Arpents et Six Arpents.

	Conc. (µg/L)	Charge spécifique (kg/ha-an)	Charge annuelle (kg/an)	Conc. (µg/L)	Charge spécifique (kg/ha-an)	Charge annuelle (kg/an)	Conc. (µg/L)	Charge spécifique (kg/ha-an)	Charge annuelle (kg/an)
Ca	38 806	165	278 685	47 638	76	69 084	47 013	165	49 170
MES¹	52 420	224	378 336	15 237	24	21 816	33 344	117	34 866
P Total	173.3	0.74	1 250	82.8	0.13	118	96.5	0.34	101
P dissous	73.3	0.31	524	39.3	0.06	55	46.3	0.16	48
NO₃	4 703	20.05	33 864	5 639	8.98	8 163	8 360	29.4	8 761
NH₄	166.4	0.71	1 199	79.2	0.13	118	111.2	0.39	116
1: Les flux de MES sont estimés sur la base des observations de turbidité mesurées en continu aux trois stations hydrométriques.									

SÉDIMENTS

La concentration instantanée de l'eau des trois ruisseaux à l'étude en matières en suspension (MES) est fortement influencée par le débit des cours d'eau (Figure 10 à 12). En règle générale, alors que le ruissellement de surface accroît sa contribution à l'écoulement du ruisseau, la concentration en MES augmente de façon exponentielle. Cette forte augmentation traduit la force érosive du ruissellement de surface à l'œuvre dans le bassin versant 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.

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

Dans l'ensemble, les charges annuelles de sédiments observées aux stations hydrométriques, comprises entre 24 et 224 kg MES/ha-an, demeurent relativement faibles comparées aux taux d'exportation mesurés dans d'autres micro-bassins versants de la Montérégie à vocation agricole (Michaud et al., 2005, 2009a, 2009b, 2012). Le relief particulièrement plat de la zone d'étude, la présence des milieux forestiers et humides et l'importance présumée des pratiques culturales anti-érosives (sans labour) sur le territoire en culture expliquent ces taux dans la fourchette inférieure des flux de sédiments documentés en Montérégie.

La charge annuelle de sédiments plus importante observée à l'exutoire du ruisseau du Grand Marais (224 kg MES/ha-an) traduit en partie l'influence de l'inondation de sa portion aval, en lien avec le refoulement du ruisseau Delisle évoqué précédemment. La charge relativement plus élevée en sédiments du Grand Marais ne tient cependant pas qu'à cette majoration de son débit, mais aussi à une concentration moyenne en sédiments (52 mg MES/L; pondérée pour le débit) relativement plus élevée que les deux autres ruisseaux (15 à 33 mg MES/L). Le bassin versant est donc manifestement plus vulnérable aux processus d'érosion. Ces charges relativement plus élevées de sédiments s'expliqueraient notamment par la saturation prolongée des terres dans la portion aval de son bassin en proie à l'inondation, générant un ruissellement de surface plus important. Les sols du secteur aval du bassin du Grand Marais sont par ailleurs mal égouttés (Figure 17). La teneur relativement plus basse de la concentration en Ca du Grand Marais (39 mg Ca/L) que celle des Dix-huit et Six Arpents (46-47 mg Ca/L) est cohérente avec une activité hydrologique de surface relativement plus importante.

À l'inverse, le taux d'exportation de sédiments très faible du ruisseau du dix-huit Arpents (24 kg/ha-an) reflète la faible hydraulicité du cours d'eau (débit annuel moyen de 159 mm), des sols bien drainés peu enclins au ruissellement de surface (Figure 17), de même qu'une occupation forestière significative. La concentration moyenne en matières en suspension (pondérée pour le débit), de l'ordre de 15 mg MES/L y est deux fois moins élevée qu'aux Six Arpents, et trois fois élevée qu'au Grand Marais (Tableau 4).

La charge annuelle moyenne de sédiments mesurée au ruisseau du Six Arpents (117 kg /an) est intermédiaire entre celles de ses deux voisins (Tableau 4). Les évaluations de Lessard et Biron, 2017 suggère que le bassin est influencé par la zone d'inondation occasionnée par le refoulement du ruisseau Léger (Figure 10), mais dans une moindre mesure que le bassin du Grand Marais. Le pompage des eaux du ruisseau en amont de l'autoroute favorise possiblement l'évacuation d'une partie de ces eaux excédentaires, bien que ce soit difficile à démontrer avec les données disponibles. Enfin, les sols du bassin du ruisseau des Six Arpents sont relativement mieux égouttés qu'au Grand Marais, ce qui les prédisposent moins à l'émission de ruissellement et d'érosion.

PHOSPHORE

Globalement, les charges spécifiques annuelles de phosphore total estimées pour les trois ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique reflètent leurs charges respectives de sédiments, avec des pics bien démarqués lors des épisodes de redoux et de fonte printanière (Figures 10 à 12). De 0.13 kg P/ha aux Dix-huit Arpents, la charge annuelle est triplée aux Six Arpents (0.34 kg P/ha) et multipliée par cinq au Grand Marais (0.74 kg P/ha). Les gradients spatiaux dans l'occupation du territoire, du drainage naturel des sols et de l'influence de la zone d'inondation citées précédemment expliqueraient encore ici le patron des exportations de phosphore. En termes de concentration en P total, ces flux se traduisent en concentrations annuelles moyennes pondérées pour le débit dans l'ordre de 82, 97 et 173 ug P/L, respectivement, aux Dix-huit Arpents, Six Arpents et Grand Marais (Tableau 4). Entre 42% (Grand Marais) et 47% (Dix-huit et Six Arpents) de la charge annuelle de phosphore est sous forme dissoute, reflétant présumément un niveau de richesse des sols en P relativement élevé dans ce bassin à fort potentiel de rendements des grandes cultures.

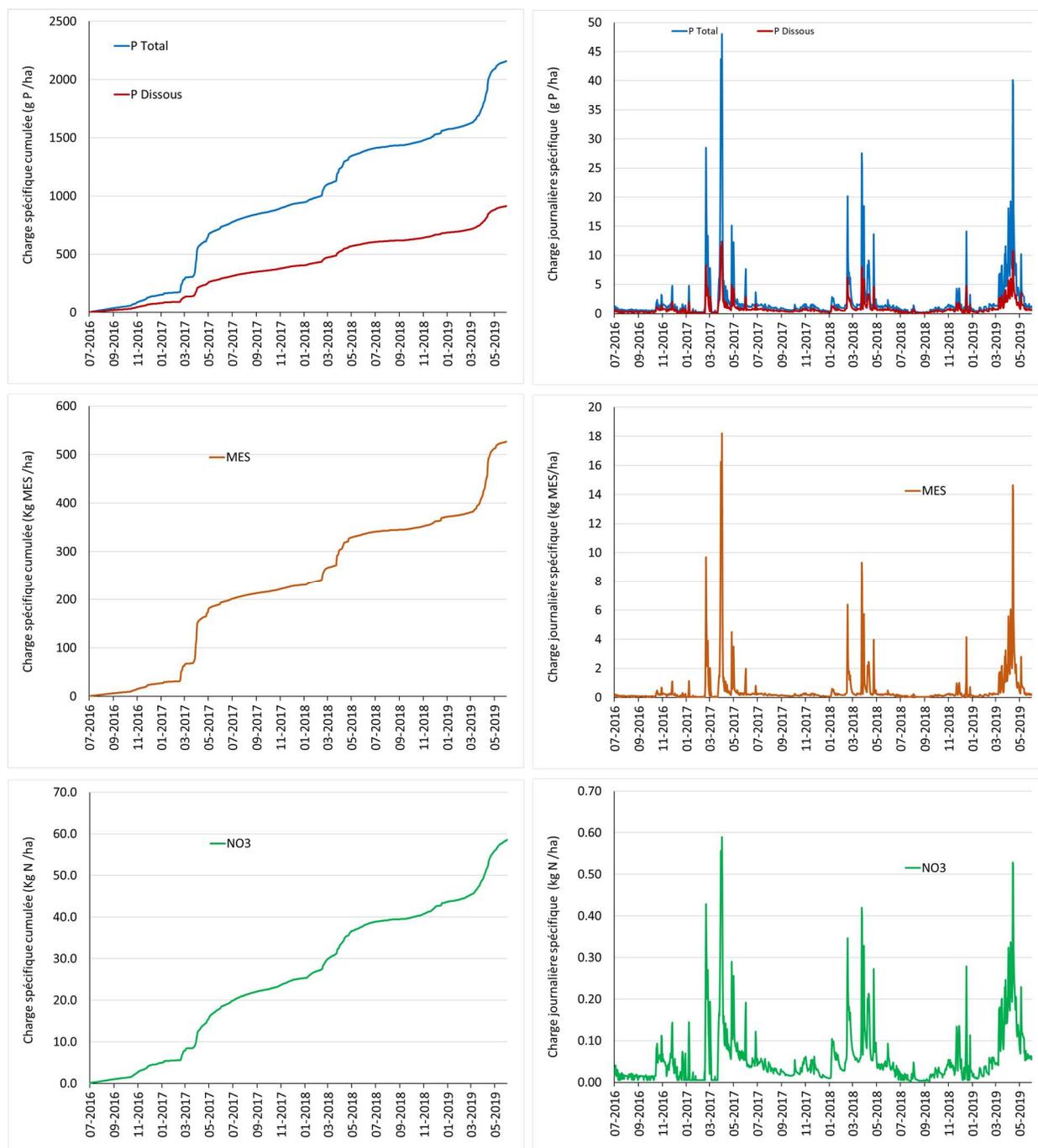


Figure 14. Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, de phosphore total et dissous, et des nitrates à la station hydrométrique Grand Marais.

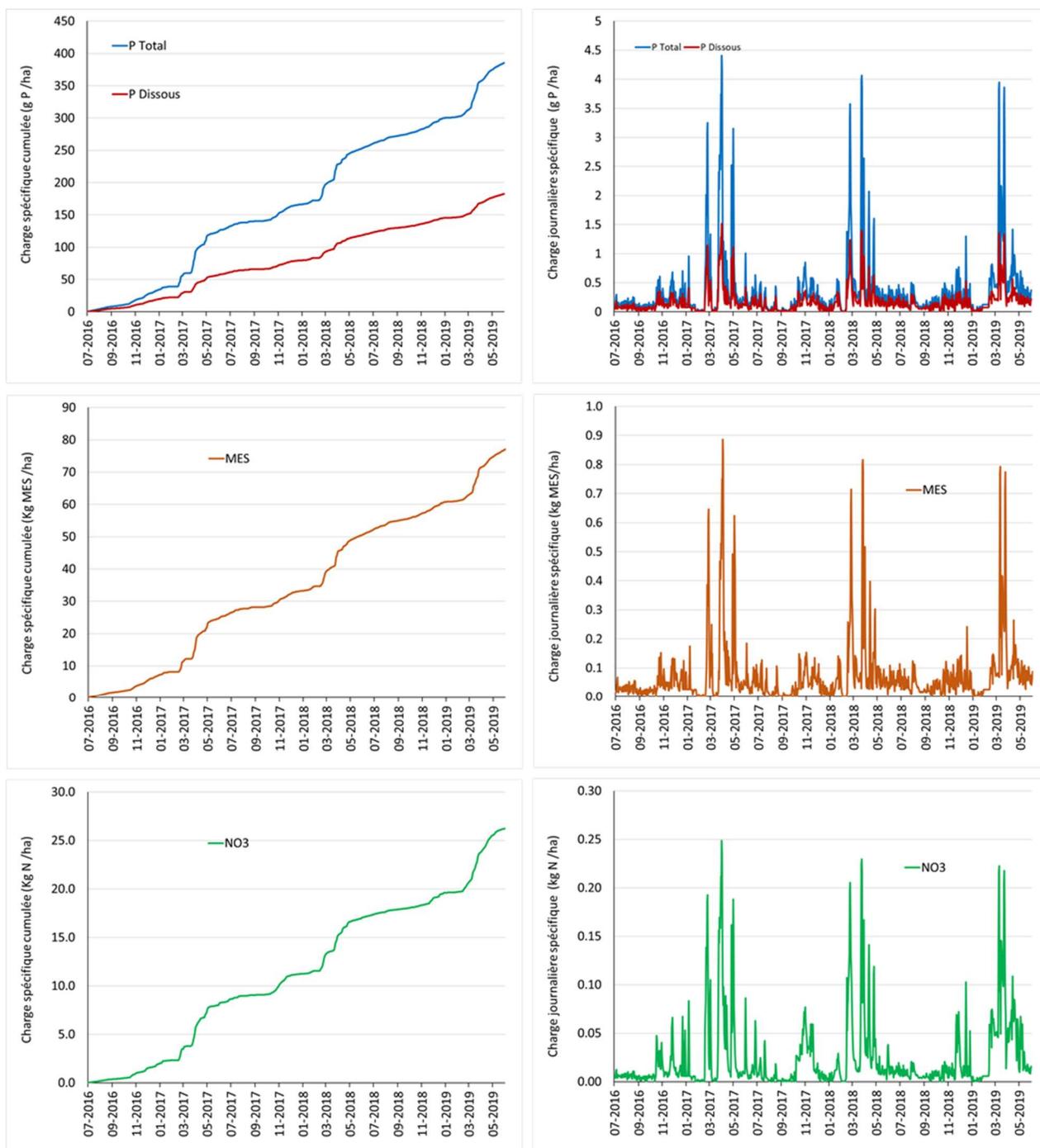


Figure 15. Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, de phosphore total et dissous, et des nitrates à la station hydrométrique du ruisseau Dix-huit Arpents.

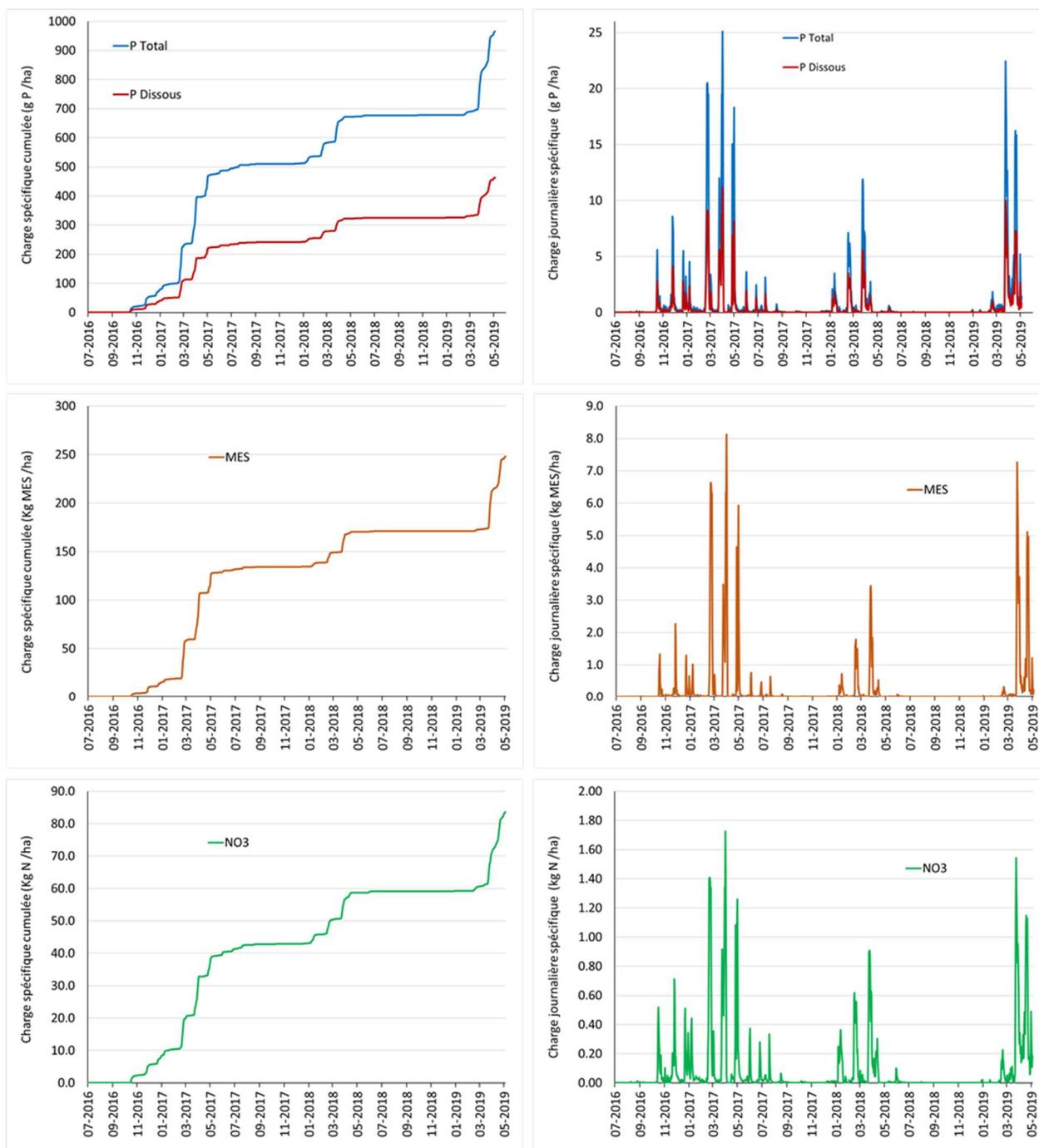


Figure 16. Distribution des flux et charges cumulées de matières en suspension, de phosphore total et dissous, et des nitrates à la station hydrométrique du ruisseau Six Arpents.

NITRATES

Les charges annuelles spécifiques de nitrates estimées pour les ruisseaux du Dix-huit Arpents, Six Arpents et Grand Marais varient respectivement de 9.0 kg N/ha, 29.4 kg N/ha à 20.0 kg N/ha, respectivement, aux stations, (Tableau 4). Suivant le même ordre des bassins, les concentrations observées, de l'ordre de 5.6, 8.4 et 4.7 mg N/L, en moyennes annuelles pondérées pour le débit. Le ruisseau du Six Arpents se distingue ainsi nettement à la hausse, tant par ses flux que par sa concentration en nitrates. Il dépasse d'ailleurs les exportations du grand Marais, alors que ce dernier exporte pourtant deux fois plus de phosphore (estimations pondérées pour la superficie des bassins, Tableau 4). Les voies de transfert contrastées du phosphore et des nitrates expliquent ce phénomène. Alors que le phosphore transite principalement par les voies du ruissellement de surface, les nitrates empruntent essentiellement la voie souterraine. Si la vulnérabilité au ruissellement de surface explique le niveau plus élevé des exportations de P au Grand Marais, la charge plus importante de nitrates au bassin du Six Arpents ne peut s'expliquer que par des taux d'apports d'azote relativement plus importants dans le bassin versant.

Les concentrations en nitrates relativement élevées en périodes automnales tardives et printanières hâtives observées aux Six Arpents trois stations (Figure 12), dans l'ordre de 10 à 13 mg N-NO₃/L, et dans une moindre mesure au Grand Marais et aux Dix-huit Arpents (6 à 10 mg N-NO₃/L; Figures 10 et 11), témoignent par ailleurs d'importants reliquats de fertilisation azotée en fin de saison de culture. Typiquement, en milieu naturel, les concentrations en nitrates diminuent en période hivernale, reflétant un ralentissement dans les processus de nitrification dans les sols et l'eau de surface. Des concentrations soutenues de nitrates en période printanière hâtive dans les trois sous-bassins à l'étude sont ici un indicateur de stock d'azote disponible en fin de saison de croissance des cultures. Ces reliquats de fertilisation azotée sont mobilisés graduellement en période de recharge de la nappe, depuis la fin de l'automne jusqu'à la crue printanière. Une implication pratique de ces concentrations en nitrates hors saison de culture est toute l'importance pour le secteur agricole de la région d'étude de tirer profit de la pleine valeur fertilisante des engrais de ferme et minéraux apportés sur les terres.

3 VOLET II : MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

L'objectif principal du volet d'étude en modélisation hydrologique était d'appuyer l'initiative de la municipalité de Saint-Zotique et ses partenaires dans leur plan d'action ciblé sur la prévention de l'envasement de canaux situés aux exutoires des ruisseaux qui traversent leur territoire. L'intérêt de l'outil GÉODEP développé réside d'abord dans l'identification des secteurs du territoire agricole les plus vulnérables à l'érosion et aux pertes de phosphore (P), puis de projeter l'atténuation de ces charges de sédiments et de P par l'implantation de pratiques culturales et d'aménagement des terres antiérosifs.

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

- L'ensemble des données utilisées dans le paramétrage du modèle et pertinentes aux propriétés géophysiques du territoire et son occupation;
- La cartographie des parcours de l'eau à haute résolution de l'ensemble du territoire à l'étude 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 au *scénario de gestion de référence* appliqué au territoire à l'étude;

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

Les sections suivantes du rapport présentent la méthodologie et les résultats de la modélisation hydrologique du risque d'exportation de sédiments et de phosphore (P) réalisée à l'échelle des bassins versants des trois ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique, soit le Grand Marais, les Dix-huit Arpents et les Six Arpents.

3.1 MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS

L'outil géospatial GÉODEP utilisé en support à la caractérisation du risque d'exportation de phosphore des bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique est une version spatialisée de l'ODEP (Outil de diagnostic des exportations de phosphore) développé par l'équipe scientifique de l'IRDA en collaboration avec la commission de la fertilité des sols du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) (Michaud et al., 2008). Concrètement, les différents modules de GÉODEP mettent à profit les banques de données géospatiales généralement disponibles en milieu rural au Québec (ex : données d'élévation, pédologie, plans de culture, etc.), de même que

des données pertinentes à la régie des sols et des cultures, afin de projeter les hauteurs d'eaux ruisselées, de même que des taux d'exportation de sédiments et de phosphore du territoire agricole. Les flux de sédiments et de nutriments mesurés aux trois stations dans le cadre du volet hydrométrique du projet ont servi de balises de validation de la performance du méta-modèle. Pour plus d'informations sur le fonctionnement et les bases théoriques de GÉODEP, le lecteur est invité à se référer aux manuels de l'utilisateur et références aux outils ODEP (Michaud et al., 2008) et GÉODEP (Drouin et al., 2014; Michaud et al., 20018).

3.1.1 Paramétrage du modèle

Pour les fins de la modélisation, la zone d'étude couvrant les bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique (34 km²) a été subdivisée en 1,370 unités de calcul, ci-après nommées Unités de Réponses Hydrologiques Homogènes (URHHH). La représentation du risque d'exportation de sédiments et de nutriments réalisée avec le support de GÉODEP pour chacune de ces URHHH est fondée sur l'intégration de deux ensembles d'informations, soit celle pertinente aux propriétés des sols et des paysages (données géophysiques), de même que celle décrivant l'occupation des sols et leur gestion. La première étape de la démarche de modélisation, soit le paramétrage du modèle, consiste à mettre en forme et intégrer l'ensemble de ces informations dans un système d'information géographique (SIG) commun. Les données pertinentes à chacune de ces couches d'information à référence spatiale sont par la suite structurées de façon à alimenter les différents modules de calcul du modèle et à générer les résultats de prédiction hydrologique. La description des différents modules et leurs bases théoriques sont décrites plus en détail par Drouin et al. (2014) et Michaud et al. (2008a; 2018b).

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 de l'année en cours et de l'année précédente (La Financière agricole du Québec, 2017, 2018);
- Les polygones de la carte écoforestière du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2010);
- Les polygones des rapports pédologiques de la zone d'étude (IRDA);
- Le relevé d'élévations à haute résolution LiDAR (Géomont, 2012);
- L'hydrographie surfacique et les cartes de base du Ministère des Ressources naturelles du Québec (BDTQ) et de Ressources naturelles Canada (Géobase).

RELIEF ET HYDROGRAPHIE

La délimitation des bassins versants et des sous-bassins versants à haute résolution a été réalisée à partir du modèle numérique d'altitude (MNA) dérivé du relevé LiDAR de 1 m de résolution (figure 17). Au préalable, le réseau hydrographique a été « brûlé » dans le SIG afin d'éliminer l'effet des ponceaux et assurer des parcours continus des écoulements, utilisés en intrants aux routines des calculs hydrologiques. Les directions et les

accumulations des parcours de l'eau ont été colligées et regroupées en sous-bassins dont le seuil minimal de superficie a été fixé à 10 ha.

PÉDOLOGIE

La figure 17 illustre la distribution spatiale des séries et phases (texture de surface) des sols du territoire à l'étude. Chaque polygone de série de sols est documenté dans la banque de données hydro-pédologiques de l'IRDA (2018). Celle-ci décrit les propriétés des sols qui sont mises à profit dans les modules de calcul du ruissellement, de l'érosion et des exportations de phosphore. Les propriétés physico-chimiques des sols (texture, structure, perméabilité, taux de matière organique, teneur en P naturel du sol) de même que l'indexation de leur groupe hydrologique et leur indice d'érodabilité sont au nombre des propriétés déterminantes mises à profit par les algorithmes de calcul de GÉODEP.

Globalement, les sols du bassin versant présentent des propriétés très diversifiées, telles que représentées au Tableau 5. La vulnérabilité à l'émission de ruissellement de surface couvre toute la gamme des Groupes hydrologiques de sol, dont le loam sableux Saint-Zotique, associé à la classe la plus vulnérable (Groupe D). En ce qui a trait à la vulnérabilité à l'érosion, la teneur des sols en limon et sable très fin est déterminante. Aussi, les facteurs d'érodabilité du sol varient de 500%, reflétant la large gamme des textures de sol de la région d'étude. Encore ici, le loam sableux Saint-Zotique se démarque par une forte érodabilité en raison de sa teneur élevée en limon et sable très fin, dépassée cependant par le loam limoneux Baudette, d'une très grande vulnérabilité à l'érosion (71% de limon et sable très fin, Tableau 5). Enfin, des richesses moyennes des sols en phosphore assimilable (Mehlich-3) de l'ordre de 143 à 242 mg/P/kg, correspondant à des indices de saturation des sols en P 6.4 à 10.1% sont tirés de l'étude de Beaudet et al. (2009).

Tableau 5. Superficies et propriétés des sols et des séries et phases de sol de la zone d'étude.

Série et phase du sol	Superficie (ha)	Groupe hydro- logique (A-D)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Sable très fin (%)	Taux de matière organique (%)	Code de permé- abilité (1-4)	Code de structure (1-4)	Facteur d'éroda- bilité	Teneur en P naturel (mg/kg)
Shefford loam graveleux	693.26	B	13	41	46	13	16.8	3	2	0.03385	1392
Sainte-Rosalie loam argileux	561.62	C	32	37	30	7	7.0	5	4	0.03532	803
Sorel sable	462.24	A	3	7	91	10	2.1	3	1	0.00835	537
Saint-Zotique loam sableux	216.41	D	10	31	59	30	10.1	3	2	0.04057	779
Soulanges loam sableux	198.17	C	7	33	60	37	5.5	3	2	0.0492	847
Sainte-Rosalie argile	178.43	C	45	27	28	7	6.4	5	4	0.02699	803
Courval loam sableux	95.50	C	13	16	70	24	4.5	3	2	0.02378	503
Saint-Amable sable	61.94	C	3	7	90	15	4.8	4	1	0.01283	447
Beaudette loam limoneux	27.07	C	18	56	26	15	6.0	4	3	0.04991	489
Saint-Bernard loam sableux	22.33	B	12	27	61	19	10.3	4	2	0.03196	923
Saint-Urbain argile	15.57	B	47	31	21	3	6.6	3	4	0.01988	726

OCCUPATION DU TERRITOIRE

Le scénario de référence de l'occupation des sols de la région d'étude a mis à profit la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD; La Financière agricole du Québec, 2017, 2018), de même que les polygones de la carte écoforestière (SIEF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2010). Afin de simplifier l'exercice de modélisation hydrologique, les classes détaillées d'occupation agricole (BDPPAD) et d'occupation non agricole du territoire (SIEF) ont été regroupées en classes généralisées d'occupation (Figure 17).

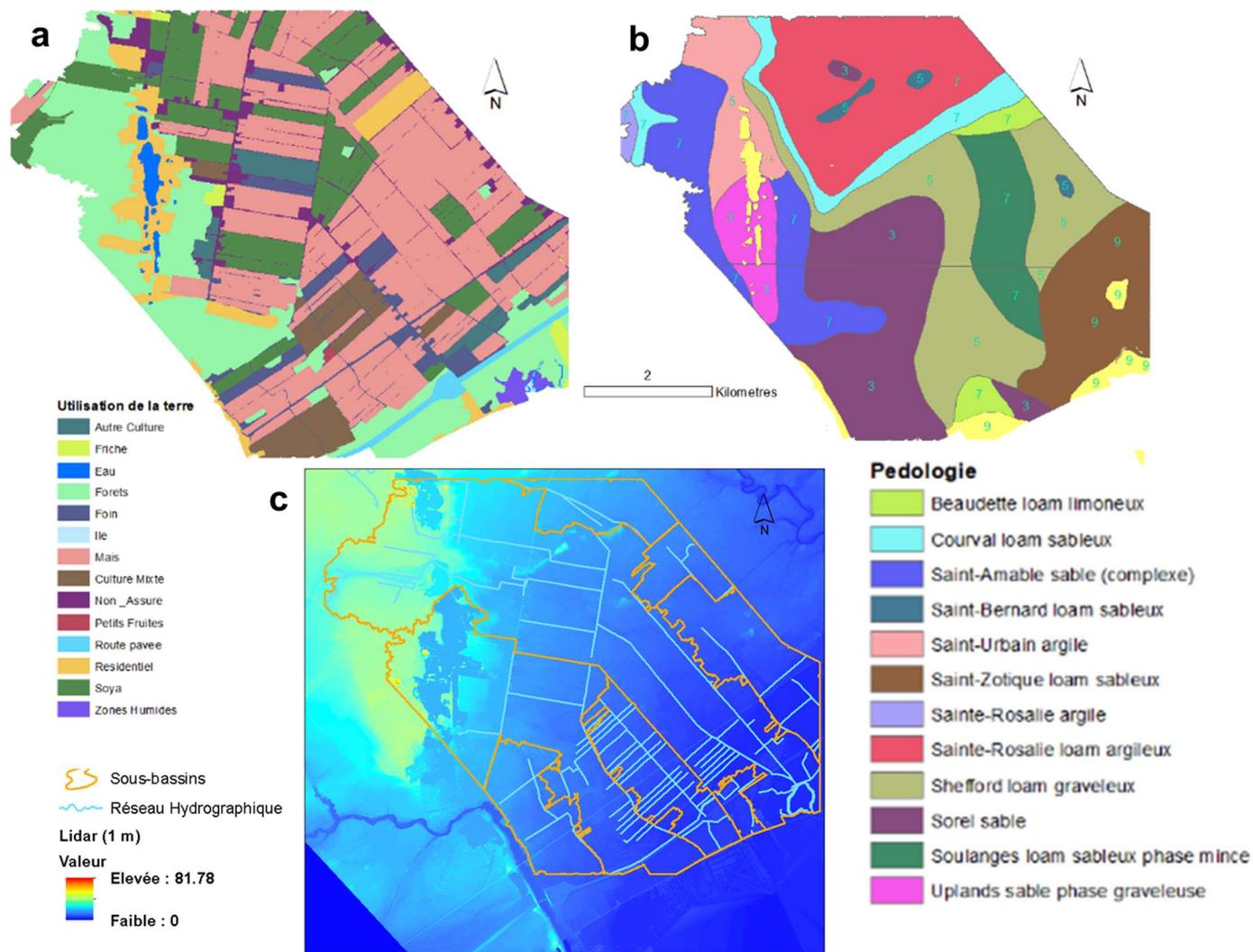


Figure 17. Occupation du sol (a), pédologie (b), relief et hydrographie (c) des bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique. La correspondance de la numérotation des groupes hydrologiques (b) est la suivante : 3:A; 5:B; 7:C et 9:D.

ANALYSE DES PARCOURS DE L'EAU ET GÉNÉRATION DU RISQUE

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

La démarche est supportée en plusieurs étapes, telles qu'illustrées en figure 18. Dans un premier temps, les polygones de parcours de l'eau sont générés par l'intersection spatiale des sous-bassins, des cours d'eau et des fossés (limites des parcelles agricoles ou réseau de routes). En second lieu, une analyse spatiale des parcours de l'eau dans chacun des polygones de parcours de l'eau permet d'y identifier le parcours de l'eau le plus long. Les statistiques de longueur et d'inclinaison de la pente sont alors générées sur chacun de ces parcours. Ces propriétés de l'écoulement sont par la suite utilisées en intrants dans le calcul du facteur topographique LS, descriptif de la vulnérabilité du relief au processus d'érosion, suivant la méthode proposée par Wall et al. (2002).

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

SCÉNARIOS DE GESTION DU PARCELLAIRE

ODEP et GéODEP ont été développés principalement afin d'évaluer les risques d'exportation de sédiments et de phosphore en milieu agricole. Aussi, les routines de calcul de prédictions des taux de ruissellement, d'érosion et d'exportation de phosphore font intervenir plusieurs informations pertinentes à l'aménagement hydro-agricole des champs et leur régie.

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

La représentation spatiale des cultures du scénario de gestion de référence a été générée sur la base des données de la BDPPAD et de la carte écoforestière (SIEF), agrégées en classes principales de cultures (céréales à paille, maïs, prairie et soja). Reflétant la vocation des entreprises agricoles de grandes cultures, 88 % de la superficie cultivée de la région d'étude est occupée par les cultures annuelles (tableau 7), incluant le maïs (54%), le soja (22%) et les céréales à paille (11%). La prairie n'occupe que 11% des superficies en culture (Tableau 7).

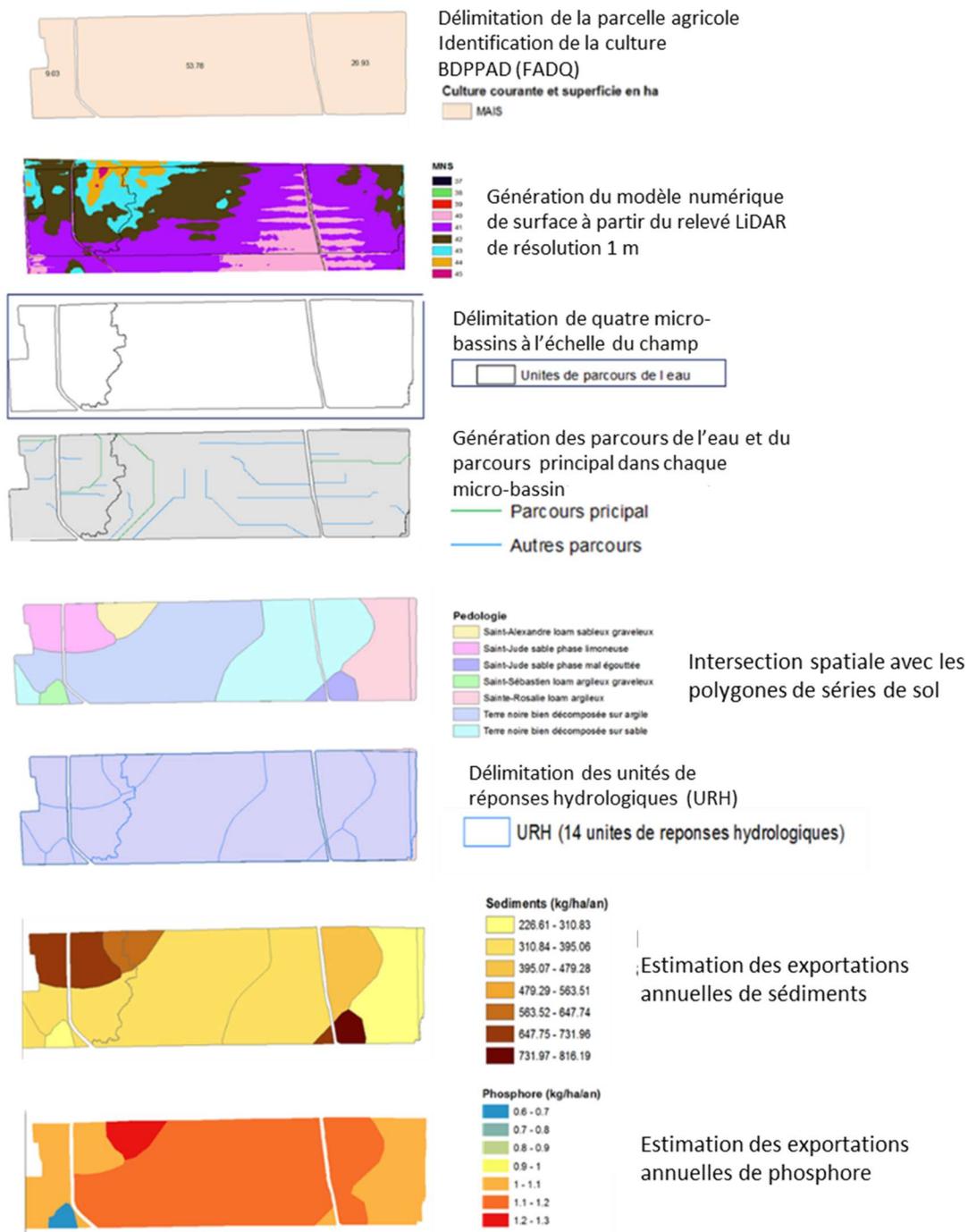


Figure 18. Illustration des différentes étapes de traitement des données à référence spatiale dans GÉODEP pour une portion de territoire à vocation agricole.

Des scénarios de régie des sols, de même que des caractéristiques d'aménagement des terres ont ensuite été attribués à chacune des classes de culture, suivant une modulation considérant le groupe hydrologique de sol. Dans l'ensemble les sols appartenant au groupe hydrologique C et D ont été considérés drainés, alors qu'un drainage naturel a été considéré pour les sols des groupes hydrologiques A et B. Le Tableau 6 illustre la distribution résultante des classes de drainage pour l'ensemble des cultures de la région d'étude.

Tableau 6. Distribution des superficies en culture et de leurs classes de drainage respectives.

Classe de culture	Superficie (ha)	(% total)	Drainage systématique (ha)	Absence de drainage (ha)	Drainé (% total)
Céréales	291	11%	183	108	63%
Maïs	1 380	54%	1 116	264	81%
Soja	558	22%	455	102	82%
Prairie	306	12%	203	104	66%
Total	2 535	100%	1 957	578	77%

Tableau 7. Distribution des superficies en culture et de leurs classes de travail du sol respectives.

Classes de cultures annuelles	Superficie totale (ha)	Labour Automne (ha)	Déchaumage Automne (ha)	Déchaumage Printemps (ha)	Semis Direct (ha)
Céréales à paille	291			130	161
Maïs	1 380	121	570		690
Soja	558	47			511
Prairie	306				
Total	2 535	168	570	130	1 362
%(Cultures annuelles)		7%	22%	5%	54%

Le Tableau 7 présente pour sa part les classes de travail du sol retenues correspondant à chaque culture. Encore ici, la modulation des classes de travail du sol s'est appuyée sur la classification du groupe hydrologique du sol dominant de la parcelle. Ainsi, en production de maïs grain, le labour d'automne est limité aux parcelles dominées par un groupe hydrologique de sol « D ». Les chaumes de maïs sont plutôt travaillés à l'automne sur les sols de groupes « C », alors que les sols du groupe « A » et « B » sont considérés en semi direct. Le soja sur groupe de sol « D » est labouré à l'automne, et autrement, en semi direct. Pour l'ensemble des céréales à paille, incluant les classes non spécifiées dans les plans de cultures généralisés, les superficies se partagent en semis direct et déchaumage printanier. Au final, un peu plus de la moitié des superficies en culture sont considérées en semi direct.

Sur le plan de la fertilisation phosphatée, l'ensemble des cultures de céréales et de soja se sont vues attribuées une fertilisation phosphatée minérale de base de l'ordre de 20 kg P₂O₅ /ha, alors que le même apport de source organique (engrais de ferme) a été attribué aux superficies en prairie. Un taux 57,5 kg P₂O₅ /ha, dont 20 unités de source minérale, a été attribué au maïs grain.

Au final, les informations suivantes ont été attribuées à chacune des unités de calcul du méta-modèle (URHHH) sous occupation agricole dans le scénario de gestion de référence retenu dans GÉODEP :

- Culture, saison courante (2018);
- Culture, saison antécédente (2017);
- Présence de culture de couverture suivant la récolte;
- Présence de culture de couverture durant la saison de production;
- Taux d'application de P, engrais minéraux en bande et à la volée;
- Taux d'apports de P des épandages d'engrais de ferme (jusqu'à deux épandages);
- Période d'épandage et délai suivant à l'incorporation pour chacun des épandages;
- Classe de travail du sol;
- Classe d'aménagement du drainage souterrain;
- Classe d'aménagement du drainage de surface;
- Classe de condition du profil cultural;
- Classe de largeur de bande riveraine;
- Présence de structures de contrôle du ruissellement et de l'érosion.

Ces données de gestion des champs ont été complétées à l'échelle des URHH par les données pertinentes aux propriétés des sols, pour la plupart documentées dans la banque de données hydro-pédologiques de l'IRDA (2018). Les données suivantes sont mises à profit par les algorithmes de GÉODEP :

- Identification de la série de sol
- Classe texturale et qualificatif du sol de surface
- Proportion (%) de sable du sol de surface
- Proportion (%) d'argile du sol de surface
- Proportion (%) de sable très fin du sol de surface
- Classe de perméabilité
- Groupe hydrologique
- Matière organique
- Teneur du sol en P, Mehlich-3
- Saturation du sol en aluminium, Mehlich-3
- Teneur naturelle en P total
- Longueur maximale du parcours de l'eau
- Pente moyenne du parcours de l'eau

Soulignons ici que les hypothèses de gestion des champs retenues dans le cadre de la présente étude ont été attribuées par l'équipe de projet, au meilleur de leur connaissance des pratiques culturelles locales. Ces résultats doivent donc être considérés qu'à titre indicatif. Une mise à jour des données du SIG, sur la base de données colligées auprès des entreprises agricoles, permettrait à terme un portrait plus fidèle des régies de culture et d'aménagement des terres des bassins versants du Grand Marais, des Dix-huit Arpents et des Six Arpents. Le recours à l'application GÉODEP, livré dans le cadre du présent projet, permet par ailleurs d'explorer, champ par champ, les effets de différents scénarios de gestion éventuellement envisagés par l'entreprise agricole et son conseiller.

3.1.2 Projections des flux de sédiments et de phosphore

Les projections de GÉODEP ont été estimées pour plus de 1,370 unités de réponse hydrologique homogène homogènes (URHH) à l'échelle de la région d'étude. Dans l'ensemble, les résultats de l'exercice de modélisation sont estimés réalistes, reflétant l'ordre de grandeur des flux observés aux stations hydrométriques des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique. Retenons cependant que GÉODEP procède par classification du risque de ruissellement, d'érosion ou de perte de P d'une parcelle de territoire donnée. L'hydrologie du territoire à l'étude, telle que décrite précédemment, est affectée par les transformations majeures apportées au réseau de cours d'eau de la région d'étude. Les effets particuliers de ces interventions sur les inondations et la rétention d'eau dans les sols ne sont reflétés par les algorithmes de GÉODEP. Les résultats du méta-modèle traduisent néanmoins les gradients spatiaux dans les débits et les flux de sédiments d'Est en Ouest révélés par les relevés hydrométriques.

Les taux d'exportation de sédiments ont été estimés pour l'ensemble des occupations agricole (74 % de la superficie du bassin), de même que la portion non agricole du bassin (26 %), incluant le milieu forestier et les autres occupations (Tableau1). Les projections de flux de sédiments par GÉODEP à l'échelle des URHH font intervenir la hauteur projetée du ruissellement de surface (Figure 23), l'érodabilité du sol, l'analyse des parcours de l'eau (longueurs et inclinaison, facteur LS) et un facteur de couverture (C) propre à l'occupation du sol et à la régie des champs. Les facteurs « C » retenus pour les occupations non agricoles du territoire, principalement associés aux routes, au milieu forestier et aux secteurs urbanisés, sont extraits d'exercices de modélisation antérieurs réalisés au Québec et au Vermont (Deslandes et al., 2006; Michaud et al., 2007; Winchell et al., 2011). Les projections d'exportation de sédiments des champs en culture ont été estimées sur la base des indices « C » de GÉODEP pour différentes combinaisons de cultures et de régie des sols (Michaud et al., 2008). Rappelons que les taux d'exportation de sédiments projetés par GÉODEP reflètent que les processus d'érosion par ruissellement dans les champs, et ne prend pas en compte dans ses calculs les phénomènes qui se produisent en cours d'eau, notamment, les processus de sédimentation ou d'érosion riveraine.

Les taux d'exportation de phosphore pour le parcellaire agricole (5 266 ha) ont aussi été estimés par les algorithmes de calcul de GÉODEP. Pour les occupations non agricoles du territoire, les coefficients spécifiques d'exportation annuelle (exprimés en kg P/ha-an) estimés par Winchell et al. (2011) ont été retenus. Ceux-ci

découlent d'une modélisation hydrologique à haute résolution calibrée pour les portions américaines des bassins des rivières transfrontalières (Québec/Vermont) aux Brochets, Missisquoi et La Roche, à laquelle l'équipe de l'IRDA a contribué. Les coefficients spécifiques d'exportation annuelle retenus expriment la contribution annuelle moyenne en phosphore total des secteurs résidentiels (0,38 kg P/ha), des routes pavées (1,17 kg P/ha), de la forêt (0,14 kg P/ha), des milieux humides (0,57 kg P/ha), des friches (0,17 kg P/ha).

Les figures 19 à 21 illustrent successivement les projections des hauteurs de ruissellement et des exportations spécifiques (sur la base de la superficie) de sédiments et de phosphore total par le modèle GéODEP pour l'ensemble du territoire à l'étude, sur la base du scénario de gestion de référence de régie des sols et des cultures décrit précédemment. La Figure 22 illustre pour sa part la distribution de ces mêmes variables, projetées pour l'ensemble des URHH du territoire à l'étude. Cette représentation des résultats illustre bien l'importante variabilité des taux de ruissellement, des charges de sédiments et des charges de P projetées par GéODEP, de même que leurs corrélations.

La distribution des taux d'exportation de sédiments exprimé en fonction des taux projetés de ruissellement de surface projetés par GéODEP est illustrée en Figure 22a. Dans l'ensemble, les taux de ruissellement projetés varient de 60 à 230 mm par an. Cette forte disparité traduit en premier lieu la classification des groupes hydrologiques des sols du bassin versant prise en compte dans le modèle (Tableau 6). La présence de drainage de drainage souterrain systématique, la classe du drainage de surface (aménagement des terres) et la condition du sol (compaction) documentée dans GéODEP (Michaud et al., 2009) contribuent aussi à moduler le taux de ruissellement de surface projeté. Bien qu'une tendance à l'augmentation du taux d'exportation de sédiments soit suggérée en réponse à l'accroissement du taux de ruissellement, la figure 22a a met en relief que l'exportation de sédiments varie considérablement pour un taux de ruissellement donné et une culture donnée. Cette dispersion dans les taux projetés d'exportation de sédiments reflète les effets cumulés du relief (longueurs et pentes des parcours de l'eau), des propriétés des sols et de la régie de la parcelle pris en compte dans le modèle. Il s'en suit une forte discrimination des taux projetés de pertes de sédiments, d'une valeur pratiquement nulle, par exemple, sur un terrain très perméable (groupe hydrologique « A »), en prairie, à près de 2 tonnes de sédiments par hectare, sur des sols peu perméables du groupe « D » labourés à l'automne.

Dans l'ensemble, les taux d'érosion les plus élevés de la zone d'étude sont associées aux cultures soja et de maïs, notamment en raison du scénario retenu de labour des sols lourds (sols du groupe « D »). La faible protection antiérosive offerte par des résidus de culture de soja (peu abondants), contribue également à cette projection de vulnérabilité élevée à l'érosion. En moyenne, les exportations annuelles de sédiments sont projetées dans l'ordre de 353 kg/ha pour le maïs et de 318 kg/ha pour le soja. Céréales et prairie demeurent en moyenne sous la barre du 150 kg/ha de sédiments exportés (Tableau 9).

En ce qui a trait au P, les résultats du suivi hydrométrique présentés précédemment indiquent qu'un peu plus de la moitié de la charge de P observée dans les bassins des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique est de nature particulière. Cette corrélation entre le taux de perte de sédiments et de P est clairement exprimée par les projections de GéODEP à l'échelle du bassin, tel qu'illustré en Figure 22b. Il n'est donc pas surprenant de constater que les superficies en culture de maïs et de soja les plus vulnérables à l'érosion (environ 1,5 T/ha-an), sont associées aux taux les plus élevés de perte de P à l'échelle de la région d'étude (environ 3 kg P/ha-an).

Bien que la distribution des taux spécifiques d'exportation de P (Figure 22b) illustre bien la corrélation entre les taux projetés de pertes de sol et de P, elle met aussi en relief une variabilité importante de la perte projetée de P pour une classe de culture donnée et présentant un taux d'érosion similaire. Conceptuellement, cette variabilité de l'exportation de P, à taux constant de perte de sédiments, illustre l'influence des taux génériques de richesse de sol en P retenu dans le paramétrage du méta-modèle (moyennes à l'échelle municipale). En fait, les algorithmes de GéODEP sont très sensibles au taux de richesse en P du sol, reflétant les études réalisées au Québec sur le sujet.

En ce qui a trait à l'influence des apports de P, rappelons que les algorithmes du modèle attribuent un effet aux apports d'engrais que dans le seul cas où ceux-ci ne sont pas incorporés au sol. Cette hypothèse reflète le consensus généralement exprimé dans la littérature scientifique que l'incorporation immédiate des engrais annule à toute fins pratiques le risque (évènementiel) d'enrichissement du ruissellement de surface, un processus actif sur les quelques premiers millimètres de la surface du sol. Dans le cas du territoire à l'étude, seules les superficies en prairie ou en semi direct ont vu leur richesse en P du ruissellement de surface ajustée en réponse à l'épandage d'engrais de ferme non incorporés. En ce qui a trait aux engrais minéraux phosphatés, considérant que la très large part est appliquée au semis et profite ainsi d'une incorporation, GéODEP n'y attribue aucun effet sur l'enrichissement du ruissellement en P. Les charges cumulées et moyennes de phosphore total projetées pour chacune des classes d'occupation du territoire à l'échelle de la zone d'étude sont présentées au Tableau 9.

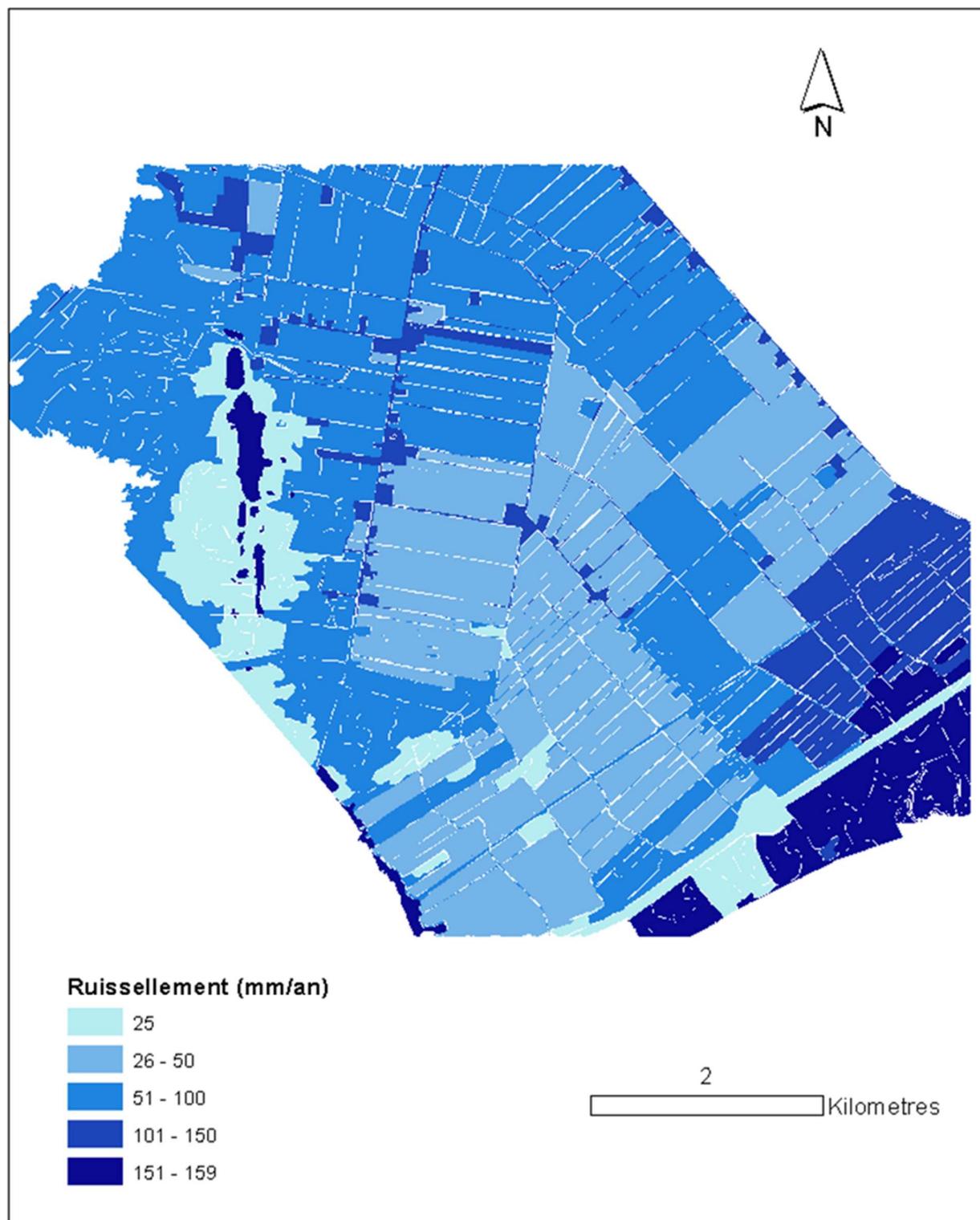


Figure 19. Projection de la hauteur de ruissellement de surface du territoire à l'étude.

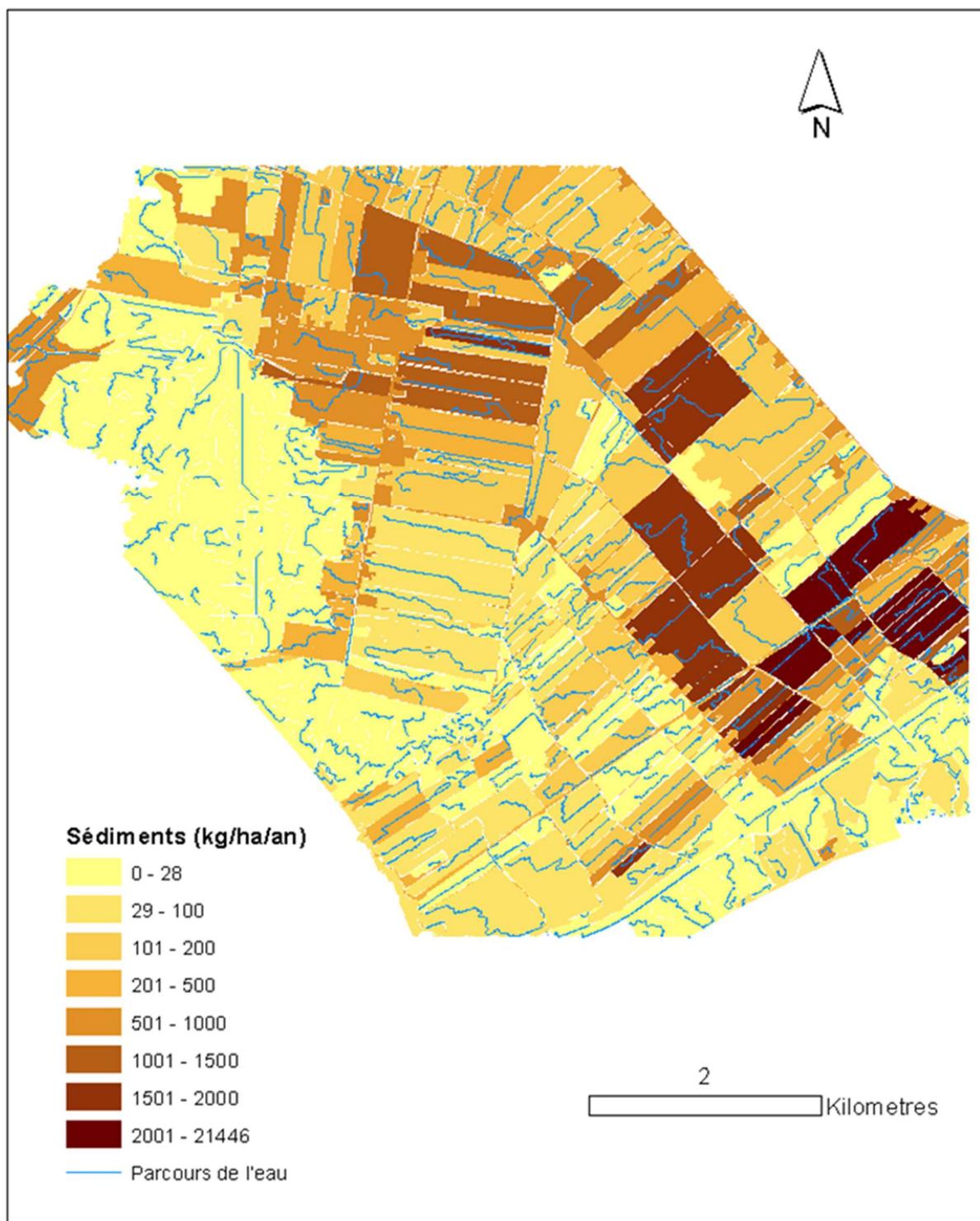


Figure 20. Projections des exportations annuelles de sédiments du territoire à l'étude.

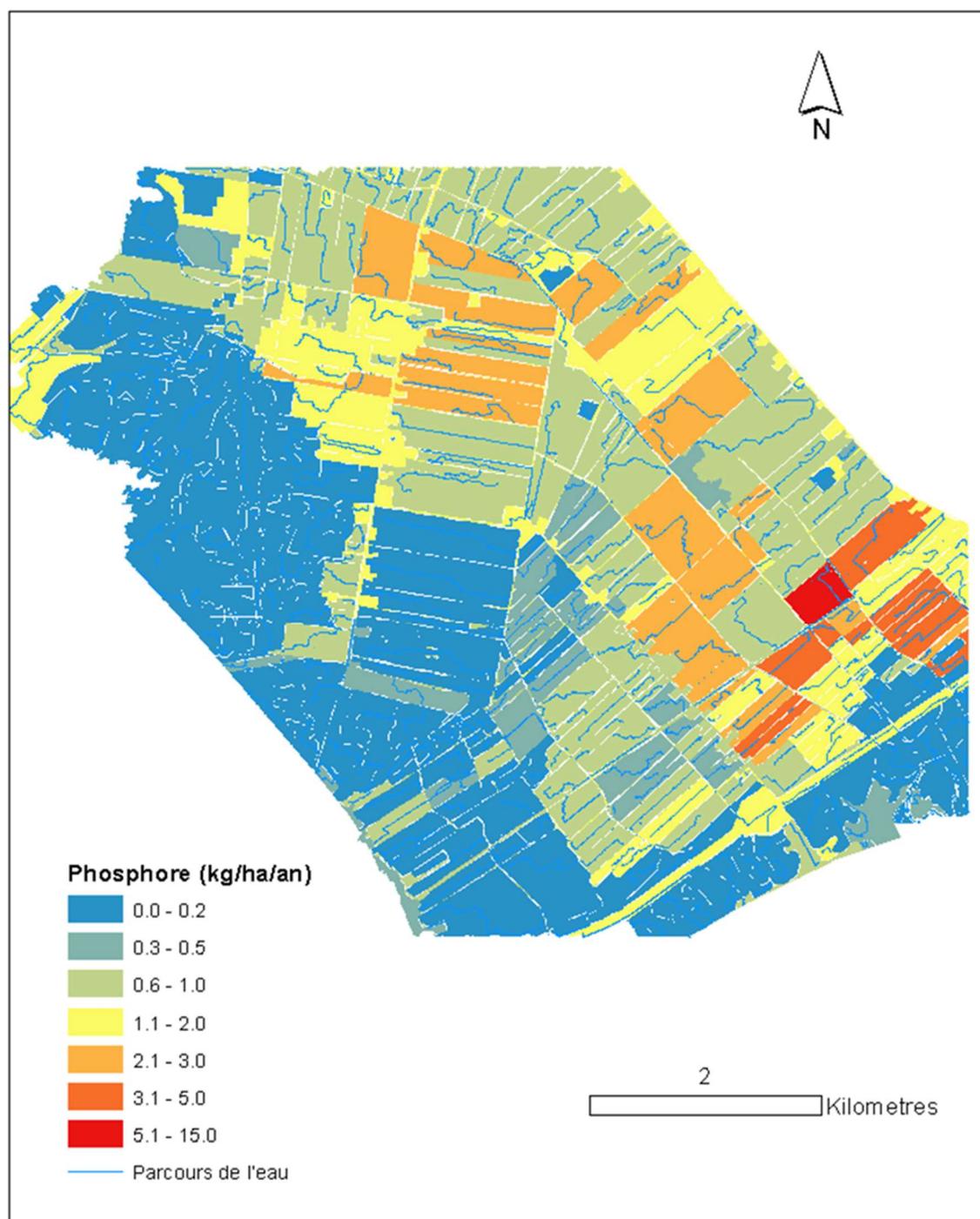


Figure 21. Projections des exportations annuelles de phosphore du territoire à l'étude.

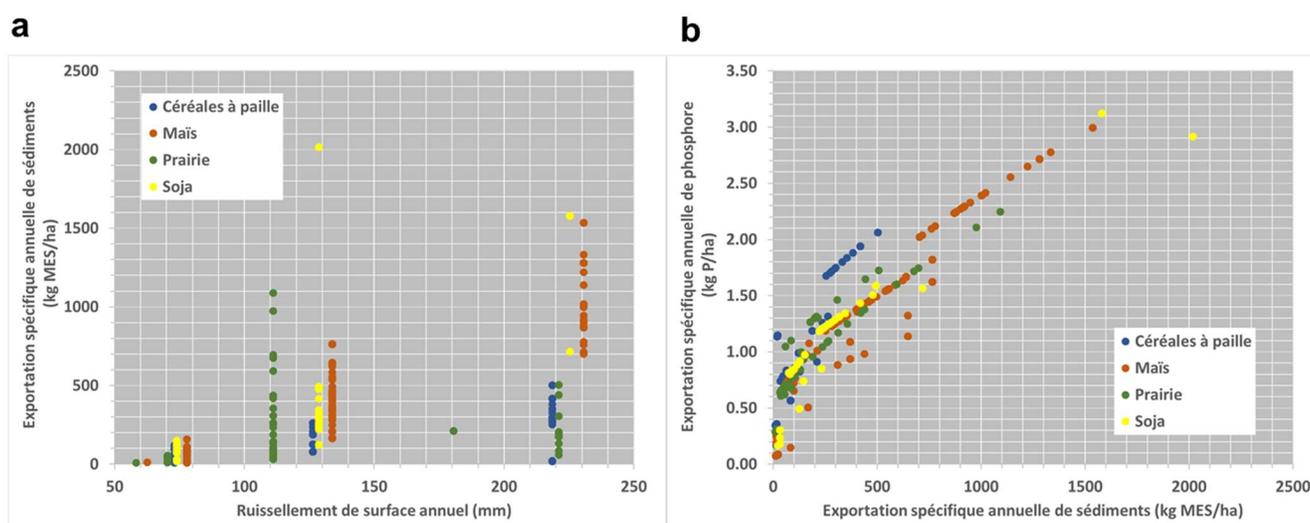


Figure 22. Projection des taux spécifiques d'exportation de sédiments des unités de réponses hydrologiques homogène (URHH) en occupation agricole du territoire à l'étude en fonction de la hauteur du ruissellement de surface (a) et projection des taux spécifiques d'exportation de phosphore en fonction du taux d'exportation de sédiments (b).

Tableau 8. Projections des charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol pour le territoire à l'étude.

	Superficie (ha)	Charge MES (kg/an)	Charge spécifique MES (kg/ha-an)	Charge P total (kg/an)	Charge spécifique P total (kg/ha-an)
Céréales à paille	291	33 396	115	229	0.79
Maïs grain	1 380	487 471	353	1 541	1.12
Soya	558	177 193	318	626	1.12
Prairie	306	44 926	147	305	1.00
Total agricole	2 535	742 987	293	2 701	1.07
Forêts	766	13 060	17	107	0.14
Friches	23	479	21	4	0.17
Routes pavées	44	1 180	27	52	1.17
Résidentiel	232	7 321	32	89	0.38
Eau	35	0	0	0	0.00
Milieux humides	22	43	2	13	0.57
Total non agricole	1 122	22 082	20	264	0.24
Total - Territoire	3 657	765 069	209	2 965	0.81

La forte dispersion des taux projetés de pertes de sol et de P par GÉODEP reflète les effets et d'interactions de plusieurs facteurs, liés d'une part aux sources de phosphore stockées (richesse du sol) ou apportées (apports d'engrais de ferme), et d'autre part aux modes de transport du P (ruissellement et érosion). Une implication pratique des résultats de la modélisation GÉODEP est la nécessaire prise en compte de l'ensemble de ces facteurs «Sources» et «Transport » dans l'appréhension de la vulnérabilité du territoire aux exportations de P. Il en sera de même pour la projection des retombées environnementales de scénarios alternatifs de gestion du parcellaire agricole. L'introduction d'une nouvelle pratique culturale ou d'un nouvel aménagement des terres verra son effet sur l'exportation de P, au final, déterminée par les propriétés des sols, du paysage et du système de culture. L'introduction du semi direct, par exemple, exacerbera la perte de P sur des champs où les engrais de ferme ne sont pas incorporés (effet antagoniste). De la même façon, le cumul de plusieurs pratiques agroenvironnementales pourra se traduire en effets synergiques. Une discussion plus détaillée de ces interactions et de leurs implications opérationnelles est proposée par Martel et al. (2006).

Une autre implication pratique des résultats de la modélisation de GÉODEP est toute la pertinence de cibler, au plan spatial, les actions agroenvironnementales en fonction de la vulnérabilité du parcellaire. Tel qu'illustré en figure 23, 20 % de la superficie en culture est associée à 60 % de la charge annuelle de P exportée des champs de la région d'étude. La projection des pertes de P est cependant moins discriminée, au plan spatial, avec 40% des charges de P associées au 20% de la superficie en culture. Cette discrimination moins importante des pertes de P tient au fait que les algorithmes du méta-modèle intègrent un facteur d'enrichissement en P des sédiments. Reflétant le principe reconnu dans la littérature scientifique, le ratio d'enrichissement en P des sédiments tend en effet à augmenter lorsque ces derniers sont moins abondants (Michaud et al., 2008). Aussi, la fraction soluble du P tend à augmenter lorsque le taux d'érosion est atténué, par le semi direct par exemple. Ce constat conduit à une troisième implication pratique de l'application de GÉODEP, soit celle de prioriser les interventions agroenvironnementales ciblées sur les sources de P (contrôle de l'enrichissement du sol et modalités des apports) lorsque la prévention de l'eutrophisation du milieu aquatique est le principal objectif de l'action agroenvironnementale.

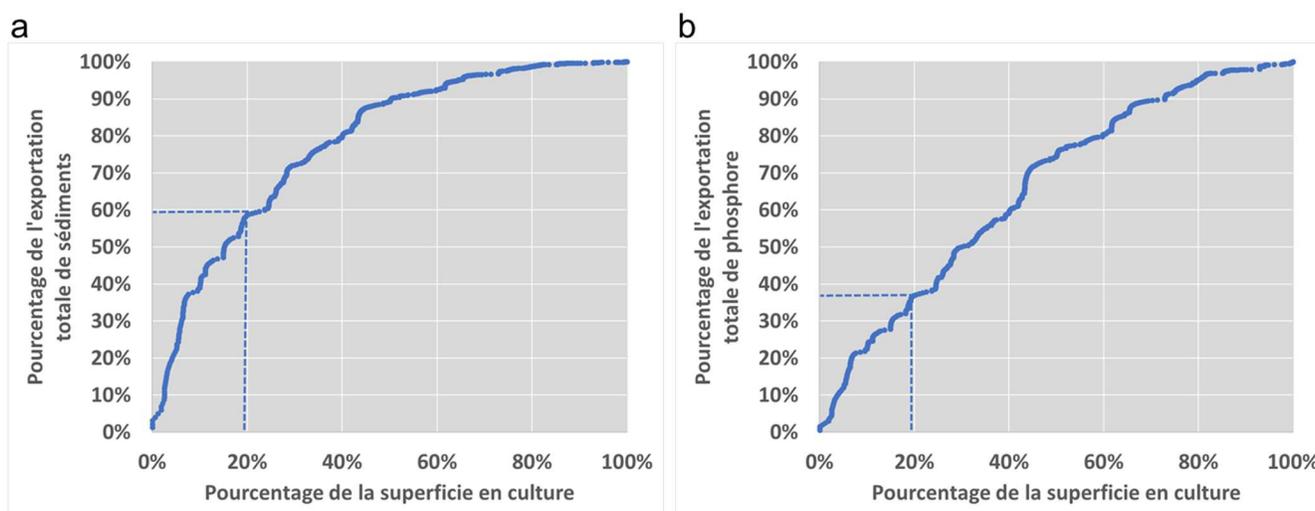


Figure 23. Cumul des charges de sédiments par ordre décroissant de vulnérabilité du parcellaire en fonction de la superficie cumulée pour le scénario de gestion de référence appliqué au territoire des bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique.

Rappelons en terminant que la plate-forme GÉODEP permet aux utilisateurs de projeter, pour un champ donné, l'effet cumulatif de plusieurs pratiques alternatives, et ce dans le contexte de régie et de propriétés des sols propres à la parcelle. En ce sens, l'application de GÉODEP développée dans le cadre de ce projet constitue un outil privilégié d'accompagnement des entreprises agricoles ciblé sur la mise en valeur des terres, des ruisseaux et des canaux de Saint-Zotique.

4 DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSIONS

Le suivi hydrométrique des trois principaux ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique pendant trois années a mis en relief des réponses hydrologiques très contrastées entre les ruisseaux, pourtant voisins immédiats. Un fort gradient d'Ouest en Est dans la perméabilité des sols et l'occupation du territoire, et surtout les transformations apportées au réseau hydrographique modèlent les émissions de ruissellement, de sédiments et de nutriments mesurés aux exutoires des trois bassins versants à l'étude. La zone d'inondation qui s'étend dans le bassin versant du Grand Marais, jusqu'au bassin du Six Arpents, générée par le refoulement du ruisseau Léger, a un effet manifeste sur les débits et les flux de sédiments et de phosphore mesurés au ruisseau du Grand Marais, et dans une moindre mesure au ruisseau des Six Arpents, qui profite d'une évacuation artificielle (pompage). Dans l'ensemble, les épisodes de précipitations liquides en hiver et la période de fonte du couvert hivernal contribuent à l'essentiel des charges annuelles de sédiments des trois ruisseaux.

Les charges annuelles spécifiques de sédiments (pondérées pour la superficie des bassins) des trois ruisseaux sont également très contrastées, variant de 24, 117 et 224 kg MES/ha-an aux ruisseaux des Dix-huit Arpents, Six arpents et Grand Marais, respectivement. Bien que les charges de sédiments et de nutriments du ruisseau du Grand marais soient relativement plus importantes, elles affectent qu'une portion marginale des canaux. Considérant les seuls ruisseaux des Dix-huit et Six Arpents, principaux affluents de la zone des canaux de saint-Zotique, la charge globale de sédiments charriée aux canaux depuis les bassins versants est modeste, soit dans l'ordre de 57 tonnes métriques par année. Exprimées en charge spécifique (par unité de surface, superficie totale contributive de 1,207 ha), celle-ci correspond à environ 50 kg de sédiments par hectare de bassin versant. Toutes proportions gardées, ce taux de charge spécifique est marginal en comparaison des relevés similaires réalisés dans d'autres petits bassins versants agricoles de la Montérégie, qui atteignent entre 300 et 1,200 kg MES/ha-an.

Le taux d'exportation de sédiments très faible du ruisseau des Dix-huit Arpents reflète la nature des sols, bien drainés et peu enclins au ruissellement de surface, de même qu'une occupation significative en milieux forestiers et humides. La charge plus importante de sédiments du ruisseau des Six arpents vers les canaux, qui demeure néanmoins modeste (117 kg MES/ha-an), traduit notamment l'influence des modifications au parcours naturel de

l'eau de surface. Ceux-ci ont pour effet de favoriser l'émission de ruissellement de surface et les phénomènes d'érosion sur le territoire exclusivement à vocation agricole.

Globalement, les charges spécifiques annuelles de phosphore total estimées pour les trois ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique reflètent leurs charges respectives de sédiments, avec des pics bien démarqués lors des épisodes de redoux et de fonte printanière. De 0.13 kg P/ha aux Dix-huit Arpents, la charge annuelle est triplée aux Six Arpents (0.34 kg P/ha) et multipliée par cinq au Grand Marais (0.74 kg P/ha). Les gradients spatiaux dans l'occupation du territoire, du drainage naturel des sols et de l'influence de la zone d'inondation citées précédemment expliquerait encore ici le patron des exportations de phosphore. Entre 42% (Grand Marais) et 47% (Dix-huit et Six Arpents) de la charge annuelle de phosphore est par ailleurs observée sous forme dissoute, reflétant présumément la richesse des sols en P dans ce bassin à fort potentiel de rendements des grandes cultures.

Sur le plan de l'azote, les mesures de concentration en nitrates des ruisseaux témoignent de teneurs relativement élevées en périodes automnales tardives et printanières hâtives, soit dans l'ordre de 10 à 13 mg N-NO₃/L aux Six Arpents, et de 6 à 10 mg N-NO₃/L au Grand Marais et aux Dix-huit Arpents. Ces observations témoignent d'importants reliquats de fertilisation azotée en fin de saison de culture. Une implication pratique de ces concentrations en nitrates, hors saison de culture, est tout l'intérêt pour le secteur agricole de la région d'étude de rationaliser les apports engrais azotés apportés sur les terres.

La réalisation du volet d'étude en modélisation hydrologique a permis pour sa part de projeter la vulnérabilité du territoire des bassins versants des trois ruisseaux de la municipalité aux émissions de ruissellement et exportations de sédiments et de phosphore. Cette représentation par GÉODEP pour chacune des 1,370 unités de calcul du modèle reflète l'intégration des gradients spatiaux pertinents aux propriétés des sols et des paysages (données géophysiques), de même que celle décrivant l'occupation des sols et leur gestion. Dans l'ensemble, les taux d'érosion les plus élevés projetés pour la zone d'étude sont associées aux cultures soja et de maïs, sur les sols peu perméables labourés à l'automne. Les champs en culture de soja, bien que non labourés à l'automne demeurent également vulnérables, en raison d'une faible protection anti-érosive offerte par des résidus de culture peu abondants. En moyenne, les exportations annuelles de sédiments sont projetées dans l'ordre de 353 kg/ha pour le maïs et de 318 kg/ha pour le soja. Céréales et prairie demeurent en moyenne sous la barre du 150 kg/ha de sédiments exportés. Cette vulnérabilité demeure cependant fortement discriminée sur le plan spatial à l'échelle du territoire. Environ 20 % de la superficie en culture est associée à 60 % de la charge annuelle de sédiments exportée des champs de la région d'étude. Une implication pratique de cette projection par GÉODEP est toute la pertinence de cibler, au plan spatial, les actions agroenvironnementales en fonction de la vulnérabilité du parcellaire.

En ce qui a trait au phosphore, les projections d'exportation de GÉODEP demeurent fortement corrélées à celles des sédiments. Cette corrélation reflète les résultats du suivi hydrométrique des trois ruisseaux, qui attribuait un peu plus de la moitié de la charge totale de P à sa fraction particulaire. Les superficies en culture de maïs et de soja les plus vulnérables à l'érosion (environ 1,5 T/ha-an), sont ainsi associées par GÉODEP aux taux les plus élevés de perte de P à l'échelle de la région d'étude, soit environ 3 kg P/ha-an.

Il est important de souligner que les hypothèses de gestion des champs retenues dans le cadre de la présente modélisation ont été attribuées par l'équipe de projet, au meilleur de leur connaissance des pratiques culturelles locales. Ces résultats doivent donc être considérés qu'à titre indicatif. Une mise à jour éventuelle du paramétrage du modèle, sur la base de données colligées auprès des entreprises agricoles, permettrait à terme un portrait plus fidèle des régies de culture et d'aménagement des terres des bassins versants du Grand Marais, des Dix-huit Arpents et des Six Arpents. Le recours à l'outil GÉODEP, livré dans le cadre du projet, permet par ailleurs d'explorer, champ par champ, les effets de différents scénarios de gestion éventuellement envisagés par l'entreprise agricole et son conseiller, et ce dans les contextes de régie et de propriétés des sols propres à la parcelle. À ce titre, les résultats de l'étude suggèrent que l'implantation de cultures de couverture dans les champs de soja, la rotation avec des céréales d'automne, de même que la généralisation de culture sur résidus (sans labour) dans les céréales à paille et le maïs apparaissent d'emblée comme des avenues les plus efficaces pour protéger les sols de l'érosion en période critique de ruissellement, depuis les récoltes automnales jusqu'au semis printaniers. L'investissement dans l'aménagement de bandes riveraines élargies et de structures de captage et de sédimentation dans les fossés se justifie également sur le plan de la préservation des cours d'eau, particulièrement dans les secteurs affectés par l'inondation. L'investissement complémentaire dans l'aménagement de bandes riveraines élargies et de structures de captage et de sédimentation dans les fossés se justifie également sur le plan de la préservation des cours d'eau, particulièrement dans les secteurs affectés par l'inondation.

Soulignons enfin qu'une implication pratique à des apports marginaux de sédiments, depuis les bassins versants des ruisseaux affluents des canaux de Saint-Zotique, est que d'autres sources de sédiments contribuent au problème d'ensablement/envasement des canaux. Les phénomènes provenant du lac, en lien avec les vents d'automne et l'érosion de la plage seraient dès lors vraisemblablement impliqués. La nature sablonneuse, plutôt que limoneuse et argileuse, des dépôts observés à l'embouchure des canaux au fleuve favorise cette thèse d'apports fluviaux.

En ce qui a trait aux apports de nutriments, le suivi hydrométrique des ruisseaux témoignent d'apports modérés en phosphore mais élevés en azote. S'il est établi que les bassins versants agricoles contribuent à cet enrichissement des eaux, motivant le faucardage des canaux, il est également fort possible que les pratiques de fertilisation des parcelles par les riverains exacerbent la problématique. La substitution des apports d'engrais minéraux des résidents par l'introduction de légumineuses herbagères (trèfle blanc) ne saurait qu'être bénéfique pour la qualité du milieu aquatique des canaux.

En terminant, rappelons que la loi no 132 concernant la conservation des milieux humides et hydriques récemment adoptée au Québec interpelle particulièrement la municipalité de Saint-Zotique et la MRC de Vaudreuil-Soulanges en raison des nombreux milieux humides sur le territoire. Un plan de protection de ces milieux doit en effet être développé au cours des prochaines années. Il y a là assurément une opportunité de valoriser les milieux humides des bassins versants des ruisseaux Dix-huit Arpents et du Six Arpents dans leurs fonctions de laminage des crues et de sédimentation, en amont des canaux de Saint-Zotique.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Amyot, F. et P. Biron. 2016. Sedimentation in the St-Zotique Canals: Sources, Causes, and Potential Management Solutions. Honours Thesis. Supervision par Pascale Biron, Université Concordia.
- Beaudet, P., M. Grenier, M. Giroux, V. Girard. 2009. Base de données sur les statistiques des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec.
- Drouin, A., I. Beaudin et A. Michaud. 2014. GEODEP : l'outil de diagnostic des exportations de phosphore spatialisé. Fiche synthèse, IRDA. 2 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/geodep-l-outil-de-diagnostic-des-exportations-de-phosphore-spatialise/>
- Deslandes, J., I. Beaudin, A. R. Michaud, F. Bonn and C. A. Madramootoo. 2006. Influence of landscape and cropping system on phosphorus mobility within the Pike River watershed of Southwestern Quebec. Canadian Water Resources Journal 32(1): 21-42.
- Géomont, 2012. Relevé LiDAR de la Montérégie Ouest.
- 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.
- IRDA. 2018. Site WEB. Diffusion/Publications.
<https://www.irda.qc.ca/fr/publications/?EmployeId=80&TypePubId=&LangId=>
- La Financière agricole du Québec, 2017, 2018. 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/>
- Lessard, F. 2017. Impacts of Past Human Interventions in an Agricultural Watershed and Possible Mitigation Measures. Honours Thesis. Supervision de Pascale Biron. Université Concordia.

- Martel, S., S. Seydoux, I. Beaudin et A.R. Michaud. 2006. Évaluation des effets combinés des principales pratiques de gestion bénéfiques. Revue de littérature réalisée dans le cadre de l'Initiative nationale d'élaboration de normes agroenvironnementales (INENA). 119 pages. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/evaluation-des-effets-combines-des-principales-pratiques-de-gestion-benefiques-pgb/>
- 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 : Étude de cas du bassin versant du ruisseau au Castor, tributaire de la rivière aux Brochets, Québec. *Agrosol* 16(1), pp. 57-59.
- https://www.researchgate.net/publication/274762064_Cropping_soil_type_and_manure_application_effects_on_phosphorus_export_and_bioavailability
- Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beudet et J. Lagacé. 2008. ODEP; un Outil de diagnostic des exportations de phosphore. Manuel de l'utilisateur. Projet « Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec », réalisé dans le cadre de l'Initiative d'appui aux conseillers agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada. <https://www.irda.qc.ca/fr/outils-et-services/odep/>
- Michaud, A.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009a. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), MAPAQ, Club du bassin La Guerre, Dura-Club, Club de fertilisation de la Beauce, Fonds d'action québécois pour le développement durable, Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec et Programme d'aide technique de Couverture végétale du Canada. Québec, Québec, 155 p. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/204.html>
- Michaud, A.R, J. Desjardins, M. Grenier et R. Lauzier. 2009b. Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et au Castor – Dans le cadre du projet Lisière verte. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets, AAC (PASCAA) et MAPAQ, Québec, Québec, 27 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/suivi-de-la-qualite-de-l-eau-des-bassins-versants-experimentaux-ewing-et-aux-castors-dans-le-cadre-du-projet-lisiere-verte/>
- Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport sommaire pour la

période de référence 2009-2011. Rapport réalisé dans le cadre du projet Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Québec, Canada. 87 pages et annexes. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/197.html>

Michaud, A.R., M.A. Niang, A. Blais-Gagnon, F. Landry, W. Huertas, J. Desjardins et M. Grenier. 2018. Outil de diagnostic et de prédiction des exportations diffuses de sédiments et de nutriments – GéODEP+N. Rapport scientifique de projet N° IA113111, Programme Innov'action agroalimentaire, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 68 pages.

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2010. Carte écoforestière.

Murphy, J., et J.R. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphates in surface waters. *Anal. Acta* 27:31-36.

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.

Winchell, M., D. Meals, S. Folle, J. Moore, D. Braud, C. DeLeo et K. Budreski. 2011. Identification of critical sources areas of phosphorus within the Vermont sector of Missisquoi bay basin. Stone Environmental Inc. Project ID 092156-G. For Lake Champlain Basin Program. www.lcbp.org/techreportPDF/63B_Missisquoi_CSA.pdf

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

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

