

RAPPORT FINAL

ANALYSE COÛTS-EFFICACITÉ DES ACTIONS PROPOSÉES POUR RÉDUIRE DE 40% LES CHARGES DE PHOSPHORE DE LA RIVIÈRE LA ROCHE À LA BAIE MISSISQUOI

COST-EFFICIENCY ANALYSIS OF PROPOSED ACTIONS NEEDED TO REDUCE PHOSPHORUS LOADS FROM THE ROCK RIVER SUBWATERSHED TO MISSISQUOI BAY BY 40%

1^{ER} AVRIL 2019



ANALYSE COÛTS-EFFICACITÉ DES ACTIONS PROPOSÉES POUR RÉDUIRE DE 40% LES CHARGES DE PHOSPHORE DE LA RIVIÈRE LA ROCHE À LA BAIE MISSISQUOI

PRÉSENTÉ À :

Organisme de bassin versant de la baie Missisquoi (OBVBM).
Bedford, Québec

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Aubert Michaud, Ph. D., IRDA
- Mohamed Abou Niang, PhD, IRDA

COLLABORATEURS

- Luc Belzile, MSc, IRDA
- Frédéric Chouinard, OBV Baie Missisquoi
- Johanne Bérubé, OBV Baie Missisquoi

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet a été financée par le Programme du bassin versant du Lac Champlain (Lake Champlain Basin Program) dans le cadre du volet Soutien à Prévention de la pollution et à préservation des habitats 2017 (2017 Pollution Prevention & Habitat Conservation Grants).

Des remerciements sont adressés à M. Marc Simoneau et à l'équipe de la Direction du suivi du milieu aquatique du Ministère de l'Environnement et de la lutte aux changements climatiques du Gouvernement du Québec pour le partage de données de suivi hydrométriques.

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Michaud, A.R. et M.A. Niang. 2019. ANALYSE COÛTS-EFFICACITÉ DES ACTIONS PROPOSÉES POUR RÉDUIRE DE 40% LES CHARGES DE PHOSPHORE DE LA RIVIÈRE LA ROCHE À LA BAIE MISSISQUOI. Rapport scientifique final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), OBV- Baie Missisquoi, Lake Champlain Basin Program. 65 pages plus annexes.

Summary

The Rock River subwatershed has the highest phosphorus and sediment export rates amongst Missisquoi Bay Basin affluents, mainly due to agricultural activity. This transboundary subwatershed occupies a total of 143 km² including 50 km² (34%) on the Québec side. Agricultural land covers 54% of the Quebec territory, of which 40% are annual crops. The purpose of this project was to locate critical source areas of phosphorus and to identify cost-efficient BMPs in order to promote acceptability and support their adoption by the farming community. Project outputs include a description of the Rock River subwatershed's critical source areas of sediment and nutrients to surface waters in its Québec and Vermont portions; an identification of BMP combinations for the Québec sector to meet the 40% target in P loadings reduction; and a projection of the cost-efficiency ratios for the selected alternative management practices.

The phosphorus (P) loadings predicted by the meta-model P-EdiT (Phosphorus export diagnostic tool) were in agreement with the loadings estimates computed from upstream (Vermont sector, 6,70 TP/yr) and downstream (Quebec sector, 3,53 T P/yr) hydrometric data for the 2001-2017 time period. The annual specific P loading rates for the agricultural sectors of Vermont and Québec were estimated at 1,59 and 1,39 kg P/ha, respectively. For both study regions, predicted P loading rates were highly discriminated spatially. About 50% of the P loadings from the agricultural sector came from 17% of the cropped area in Québec, as compared to 20% in Vermont.

The selection of BMPs for the alternate agricultural management scenario in Quebec followed four objectives, namely: 1) the prevention of erosion within corn and soya fields using crop residue management and cover crop; 2) the soil incorporation of liquid manure; 3) riparian zone management and 4) land use conversion for the inundation corridor and land excessively vulnerable to erosion. The cumulative effect of BMP's resulted in a 58% predicted reduction in the sediment load to the river, as well as a 40% reduction in total phosphorus.

BMP implementation costs were computed and related to the sediment and P loadings abatement predicted by the P-Edit tool kit, which resulted in site-specific cost:efficiency ratios (Cost \$ / Kg P Abated) for the individual alternate management practices. Efficiency of individual practices proved to be highly variable, with cost:efficiency ratio varying from a null cost for conservation tillage for example, to 600\$/kg P for incorporation of liquid manure in hay fields. The alternate management practices were ranked following their efficiency, from highest to lowest cost effectiveness in preventing P losses: Conservation tillage > Conversion of critical acres in annual crops > Cover cropping > Riparian zone management > River corridor over the mobility and inundation zones > Conversion of critical acres in hay > Incorporation of liquid manure in hay.

Considering the particular decision-making process of an action focused on non-point source contaminants, this study demonstrated the pertinence of coupling the predicted site-specific efficiency of alternate agricultural management practices to their respective implementation costs. The P-Edit tool kit proved to be effective in identifying combinations of BMPs which conciliate the effectiveness from an environmental perspective, to economic efficiency.

Résumé

Le bassin versant de la rivière de la Roche est associé aux taux les plus élevés d'exportation de sédiments et de phosphore parmi les affluents de la Baie Missisquoi du Lac Champlain. Les sources agricoles diffuses de phosphore sont principalement en cause. La modélisation des flux de sédiments et de phosphore réalisée pour les portions Vermontoise et Québécoise du bassin versant avec le support du méta-modèle GÉODEP a permis d'identifier les principales sources d'émission de phosphore (P) du bassin versant de la rivière de la Roche et de produire une analyse coûts-efficacité de scénarios alternatifs de gestion du parcellaire agricole permettant d'atteindre une réduction de 40% de la charge de P exporté vers la Baie Missisquoi.

Les résultats de l'exercice de modélisation GÉODEP au Québec et au Vermont témoignent d'un bon ajustement des charges de phosphore projetées par GÉODEP aux flux observés aux stations hydrométriques localisées en amont (secteur Vermont) et aval (secteur Québec) du bassin versant. Les flux de P projetés pour le parcellaire agricole sont fortement discriminés sur le plan spatial, alors que 50% de la charge projetée de P du parcellaire agricole origine de 17% (Québec) à 20% (Vermont) de la superficie en culture.

Quatre objectifs ont orienté la sélection des pratiques alternatives de gestion modélisées pour la portion Québécoise du bassin versant, soit 1) la réduction des taux d'érosion dans les cultures de maïs et de soya au moyen de la culture sur résidus et de cultures de couverture; 2) l'incorporation superficielle des engrais de ferme à l'épandage, 3) l'aménagement des zones riveraines aux cours d'eau et 4) la protection des zones inondables ou excessivement vulnérables à l'érosion. Au global, le cumul des pratiques alternatives de régie du parcellaire et d'aménagement des terres se traduit en une réduction projetée des flux de sédiments par GÉODEP de l'ordre 58%, et d'une réduction de 40% des flux de P pour l'ensemble de la zone d'étude en culture.

En parallèle à la projection des efficacités des pratiques alternatives de gestion sur le plan de la réduction des charges de sédiments et de phosphore, l'estimation de leurs coûts respectifs d'implantation a permis de projeter le ratio coût : efficacité des pratiques à l'étude (coût \$/kg P retenu au champ). Ce volet de l'étude a ainsi mis en relief une importante disparité dans l'efficacité des pratiques alternatives à l'étude. Celles-ci passent par exemple d'un coût nul pour la conversion à la culture sur résidus, à plus de 600\$ par kilogramme de phosphore pour l'incorporation des engrais de ferme. Le ratio coût : efficacité moyen projeté pour les pratiques de gestion alternative suit l'ordre décroissant suivant : Culture sur résidus > Conversion des cultures annuelles en zone critique > Cultures de couverture > Aménagement riverain > Corridor de liberté du cours d'eau > Conversion des prairies en zone critique > Incorporation des engrais de ferme.

Dans le contexte particulier de l'appui aux actions concertées à l'échelle du bassin versant, l'étude a démontré toute la pertinence de coupler les projections d'efficacité des pratiques alternatives de gestion avec leurs coûts respectifs d'implantation. L'outil GÉODEP constitue dès lors un outil privilégié d'analyse et de recherche de solutions qui concilie efficacité au plan environnemental et efficacité sur le plan économique.

Table des matières

1	Introduction	9
2	Méthodologie et résultats : Portion Québécoise du bassin versant	10
2.1	Suivi hydrométrique de la rivière de La Roche.....	11
2.2	Paramétrage du modèle, portion québécoise du bassin versant	12
2.3	Résultats de la modélisation GÉODEP pour le scénario de référence de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.....	21
2.4	Résultats de la modélisation GÉODEP et analyse économique du scénario alternatif de gestion agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.....	28
2.4.1	Aménagement riverain.....	36
2.4.2	Corridor d'inondabilité	39
2.4.3	Conversions des prairies en zones critiques.....	41
2.4.4	Conversions des cultures annuelles vulnérables.....	41
2.4.5	Culture sur résidus.....	41
2.4.6	Cultures de couverture.....	43
2.4.7	Incorporation des engrais de ferme	44
2.4.8	Scénario alternatif de gestion global.....	46
2.5	Paramétrage du modèle, portion Vermontoise du bassin versant.....	48
2.6	Résultats de la modélisation GÉODEP pour le scénario de référence de la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche	50
3	Conclusion et perspectives	57
4	Références citées.....	60
	Annexe I. Données utilisées en intrants dans la création de scénarios de gestion dans GÉODEP.	67
	Annexe II. Méthode d'estimation de la charge de phosphore liée à la perte événementielle suivant des épandages d'engrais de ferme non incorporé	69

Liste des tableaux

Tableau 1. Moyennes annuelles des débits et des charges de phosphore total, matières en suspension et azote total aux stations hydrométriques de la rivière de la Roche amont et aval, et projection des charges pour la portion québécoise du bassin versant.....	12
Tableau 2. Distribution des cultures et des aménagements du drainage souterrain des champs retenue dans le paramétrage du méta-modèle à l'échelle du bassin versant.....	19
Tableau 3. Distribution des pratiques de travail du sol pour les cultures annuelles retenue dans le paramétrage du méta-modèle à l'échelle du bassin versant.....	19
Tableau 4. Distribution des superficies d'épandage attribuées par classe de culture retenue dans le paramétrage du méta-modèle à l'échelle du bassin versant.....	20
Tableau 5. Projections des charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour le scénario de référence.....	22
Tableau 6a. Projections des scénarios alternatifs de gestion sur les exportations globales de sédiments et de phosphore par classe d'utilisation du sol à l'exutoire du bassin et sur la base de la superficie traitée de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	32
Tableau 6b. Projections des scénarios alternatifs de gestion sur les exportations globales de sédiments et de phosphore par classe d'utilisation du sol à l'exutoire du bassin et sur la base de la superficie traitée de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche (suite).	33
Tableau 7. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de sédiments et de phosphore associés à l'aménagement intégré des rives des superficies en culture de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	38
Tableau 8. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de sédiments et de phosphore associés aux conversions des cultures dans le corridor d'inondabilité, et les zones critiques de vulnérabilité à l'érosion de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.....	40
Tableau 9. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de sédiments et de phosphore associés au travail réduit du sol des superficies en maïs grain pour la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	42
Tableau 10. Différences dans les coûts de production associées à la conversion de la pratique culturale de labour vers le travail réduit du sol et le semi direct en production de maïs grain. ..	43
Tableau 11. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de sédiments et de phosphore associés aux cultures de couverture implantées dans les superficies en soja pour la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	44
Tableau 12. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de phosphore associés à l'incorporation des lisiers dans les prairies pour la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	45
Tableau 13. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de phosphore et de sédiments du scénario alternatif de gestion global.....	47

Tableau 14. Projections des charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol de la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour le scénario de référence.	54
--	----

Liste des figures

Figure 1. Occupation du sol (a) relief et hydrographie (b), et pédologie (c) de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	14
Figure 2. Illustration des différentes étapes de traitement des données à référence spatiale dans GÉODEP pour une portion de territoire à vocation agricole.	16
Figure 3. Projections de la hauteur de ruissellement de surface de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour le scénario de référence.	24
Figure 4. Projections de la charge spécifique de sédiments de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour le scénario de référence.	24
Figure 5. Projections de la charge spécifique de phosphore de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour le scénario de référence.	25
Figure 6. Projections des taux spécifiques d'exportation de sédiments des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche en fonction de la hauteur du ruissellement de surface (a) et du facteur topographique LS (b).	26
Figure 7. Projections des taux spécifiques d'exportation de phosphore des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche en fonction du taux d'exportation de sédiments.	26
Figure 8. Projections de la charge spécifique de sédiments de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour les scénarios alternatifs et de référence.	34
Figure 9. Projections de la charge spécifique de phosphore de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour les scénarios alternatifs et de référence.	35
Figure 10. Distribution croissante des charges cumulées de phosphore en fonction de la superficie cumulée pour le scénario de référence et le scénario alternatif de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	36
Figure 11. Corridor d'inondabilité et de mobilité de la portion Québécoise de la rivière de la Roche (Biron et al., 2014).	40
Figure 12. Relief et hydrographie (a), textures de surface des sols (b) et occupation du sol (c) de la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	49
Figure 13. Hauteur de ruissellement de surface projetée pour la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	51
Figure 14. Charge spécifique de sédiments projetée pour la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	52
Figure 15. Charge spécifique de phosphore total projetée pour la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche.	53

Figure 16. Projections des taux spécifiques d'exportation de sédiments des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche en fonction du facteur topographique LS..... 55

Figure 17. Projections des taux spécifiques d'exportation de phosphore des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche en fonction du taux d'exportation de sédiments..... 55

Figure 18. Distribution des charges cumulées de phosphore en fonction de la superficie en culture cumulée pour les scénarios de référence et alternatif de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche et du scénario de référence pour la portion Vermontoise du bassin versant..... 56

1 INTRODUCTION

Le sous-bassin versant de la rivière de la Roche est associé aux taux les plus élevés d'exportation de sédiments et de phosphore vers la Baie Missisquoi, principalement en lien avec des sources agricoles diffuses. L'objectif principal à l'origine du présent projet était d'identifier les principales sources d'émission de phosphore (P) du sous-bassin et de produire une analyse coût : efficacité de scénarios alternatifs de gestion du parcellaire agricole permettant d'atteindre une réduction de 40% de la charge de P exporté vers la Baie Missisquoi.

Les sections suivantes du rapport présentent les méthodes et résultats des différentes étapes de réalisation du projet.

En première étape, les flux historiques de sédiments et de nutriments ont été colligés pour les portions Vermontoise (Vt) et Québécoise (Qc) du bassin versant de la rivière de la Roche sur la base des relevés de débits et de qualité de l'eau du MELCC. Ces stations hydrométriques en opération depuis 1991 sont localisées à l'aval du bassin, près de son embouchure dans la Baie Missisquoi, de même qu'à l'entrée de la rivière au Québec, depuis le Vermont en amont. Les chroniques des flux déterminées par Simoneau (2018) permettent ainsi d'isoler les contributions de la portion Vermontoise du bassin, de celles du Québec, par soustraction du bilan amont (Vt), du bilan global à la station aval (Qc+Vt).

En deuxième étape, le méta-modèle GÉODEP a été mis à profit dans la projection spatiale des hauteurs de ruissellement, de même que des taux d'exportation de sédiments et de nutriments pour les portions Québécoise et Vermontoise du bassin versant. Une méthodologie similaire a été appliquée dans le paramétrage du modèle à haute résolution (1 m) pour le scénario de référence des deux portions de territoire, sur la base de données à référence spatiale pertinentes aux propriétés géophysiques et à l'occupation du territoire, disponibles de part et d'autre de la frontière. Les flux historiques de Simoneau (2018) ont servi de balises de validation de la performance du méta-modèle pour les portions Québécoise et Vermontoise du bassin versant.

En troisième étape, les effets de scénarios alternatifs de gestion agricole sur les flux de sédiments et de phosphore pour la portion québécoise du bassin versant ont été projetés avec le support de GÉODEP. Des combinaisons de pratiques alternatives permettant d'atteindre une réduction de 40% de la charge de phosphore ont été identifiées.

En dernière étape, les coûts d'implantation des scénarios alternatifs de gestion ont été mis en relation avec leurs efficacités respectives dans l'atténuation des flux de phosphore.

L'ensemble des données à référence spatiale utilisées en support à la modélisation, de même que les résultats représentatifs des différents portraits de gestion du territoire agricole ont été intégrés dans un système géographique à haute résolution (1m) et mis à la disposition des promoteurs Québécois et Vermontois du projet.

2 MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS : PORTION QUÉBÉCOISE DU BASSIN VERSANT

L'outil de diagnostic spatialisé des exportations de phosphore (GéODEP) développé par l'IRDA (Michaud et al, 2008, Drouin et al., 2014 et Michaud et al., 2018) a été mis à profit dans la caractérisation du risque d'exportation de sédiments et de phosphore des portions Québécoise et Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche. GéODEP consiste en une version spatialisée de l'ODEP (Outil de diagnostic des exportations de phosphore) développé antérieurement par l'équipe scientifique de l'IRDA en collaboration avec la commission de la fertilité des sols du CRAAQ et le MAPAQ (Michaud et al., 2009). Développé dans une perspective d'appui à la planification d'actions concertées ciblées sur la réduction des exportations de phosphore, l'intérêt de l'outil GéODEP réside d'abord dans l'identification des zones les plus à risque de mobilisation de P, puis dans la possibilité d'évaluer différents scénarios d'intervention sur le devenir des charges de P émises.

Concrètement, les différents modules de GéODEP mettent à profit les banques de données géospatiales généralement disponibles en milieu rural au Québec (ex : données d'élévation, pédologie, plans de culture, etc.), de même que des données pertinentes à la régie des sols et des cultures, afin de produire des estimations d'hauteurs d'eaux ruisselées et drainées, de même que des taux d'exportation de sédiments et de phosphore. GéODEP, développé par Drouin et al. (2014) reprend essentiellement les algorithmes développés pour l'ODEP, qui ont ensuite été intégrés à un Système d'Information Géographique (SIG). Une nouvelle version du code informatique développée par Michaud et al. (2018a) a introduit une procédure d'analyse spatiale des écoulements de surface à haute résolution, adapté aux relevés LiDAR, de même qu'un module de projection des pertes d'azote (GéODEP+N). Enfin, un nouveau module projetant l'effet des épandages non incorporés d'engrais de ferme sur l'enrichissement du ruissellement de surface en phosphore réactif a été introduit par Michaud et al (2018b). Ce nouveau module de calcul de l'enrichissement évènementiel du ruissellement de surface en phosphore répondait notamment au besoin de refléter l'évolution des superficies en semis direct au Québec. Pour plus d'informations sur le fonctionnement et les bases théoriques de GéODEP, le lecteur est invité à se référer aux manuels de l'utilisateur des outils ODEP et GéODEP (Drouin et al., 2014; Michaud et al., 2008; Michaud et al, 2018a, Michaud et al, 2018b).

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

- L'ensemble des données utilisées dans le paramétrage du modèle pertinentes aux propriétés géophysiques du territoire, son occupation, de même que les scénarios de gestion agricole utilisés dans les scénarios de référence de la modélisation GéODEP pour les portions Québécoise et Vermontoise du bassin versant;
- L'analyse et la cartographie des parcours de l'eau à haute résolution (1 m) de l'ensemble du territoire à l'étude, de même que les données dérivées utilisées dans l'indexation des hauteurs de ruissellement et du risque d'érosion;
- Les résultats de projections des exportations de sédiments, de phosphore et d'azote associés aux scénarios de référence pour la portion Québécoise du bassin versant, de

même que les projections de charges de sédiments et de P pour la portion Vermontoise du bassin versant.

- Les résultats de projections des exportations de sédiments, de phosphore et d'azote associés au scénario alternatif de gestion pour la portion Québécoise du bassin versant.
- 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 dérivées de la littérature scientifique.

2.1 Suivi hydrométrique de la rivière de La Roche

Les flux de sédiments et de nutriments estimés par Simoneau (2018) pour la période 1999-2017 ont été mis à profit dans le calage et la validation des projections modélisées par GÉODEP. Ces estimations ont été réalisées avec le support du progiciel EGRET (Exploration and Graphics for RivEr Trends) développé par l'United States Geological Survey (Hirsch et coll., 2010; Hirsch et De Cicco, 2015). La même approche est utilisée pour l'analyse d'observations de qualité de l'eau pour d'autres tributaires du Lac Champlain au Vermont (Medalie, 2013; 2014). Pour une description détaillée de la méthode d'analyse statistique des données de débits et de qualité de l'eau, de même que sur le plan des protocoles de dosages analytiques des échantillons d'eau, le lecteur est invité à se référer à l'étude de Simoneau (2018). Retenons toutefois que l'approche de modélisation utilise une méthode de régression pondérée (WRTDS) qui prend en compte la tendance temporelle des données, la saisonnalité et les variations de débit dans l'interprétation de la variabilité des variables de la qualité de l'eau.

Pour les besoins de la présente étude, les estimations de charges basées sur les débits normalisés ont été retenues. L'estimation normalisée de la charge pour une date donnée est une estimation moyenne considérant tous les débits qui ont été observés pour cette date au cours de la période d'analyse. L'intérêt de cette méthode tient à l'élimination des effets des variations hydrologiques interannuelles, de façon à mieux détecter d'éventuels gradients temporels dans la qualité de l'eau, résultant notamment d'actions environnementales.

Le tableau 1 présente les moyennes annuelles normalisées des débits et des charges de phosphore total, de matières en suspension et d'azote total aux stations hydrométriques de la Rivière de la Roche amont et aval, telles qu'estimées par Simoneau (2018). Les charges projetées pour la portion Québécoise du bassin versant ont été déduites en soustrayant les charges estimées pour la portion amont du bassin versant (Vt) des charges globales estimées à la station aval du bassin versant. Conceptuellement, cette approche impose l'hypothèse que les charges entrant au Québec, depuis le Vermont, cheminent à terme jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Cette hypothèse est estimée acceptable compte tenu de la portée de la présente étude. L'étude de Wang et al. (1999), réalisée dans un autre bassin agricole affluent du Lac Champlain, supporte par ailleurs l'hypothèse d'un stockage limité de P à long terme dans un système similaire au bassin de la rivière de la Roche. Les auteurs ont en effet mesuré que le stockage biotique et abiotique de phosphore en section de rivière était équivalent au flux exporté.

Tableau 1. Moyennes annuelles des débits et des charges de phosphore total, matières en suspension et azote total aux stations hydrométriques de la rivière de la Roche amont et aval, et projection des charges pour la portion québécoise du bassin versant.

Année	Rivière de la Roche amont, Vermont (7,128 ha)				Rivière de la Roche aval, Québec (12,510 ha)				Bassin de la Rivière de la Roche au Québec (Aval moins amont), (5,382 ha)			
	Débit moyen annuel m3/s	Charge moyenne annuelle t/an	Charge pour débit normalisé t/an	Coeff. exp. pour débit normalisé kg/ha	Débit moyen annuel m3/s	Charge moyenne annuelle t/an	Charge pour débit normalisé t/an	Coeff. exp. pour débit normalisé kg/ha	Débit moyen annuel m3/s	Charge moyenne annuelle t/an	Charge pour débit normalisé t/an	Coeff. exp. pour débit normalisé kg/ha
Phosphore total												
2001-2010	1.219	6.40	6.10	0.856	2.136	9.67	9.20	0.735	0.917	3.27	3.10	0.576
2011-2017	1.204	6.57	6.70	0.940	2.110	10.02	10.23	0.818	0.906	3.45	3.53	0.656
Matières en suspension												
2001-2010	1.219	2 553	2 531	355	2.136	4 509	4 506	360	0.917	1 956	1 975	367
2011-2017	1.204	3 573	3 416	479	2.110	6 365	6 058	484	0.906	2 792	2 641	491
Azote total												
2001-2010	1.219	84.9	82.9	11.6	2.136	160.3	156.1	12.5	0.917	75.4	73.2	13.6
2011-2017	1.204	83.4	82.7	11.6	2.110	145.1	143.9	11.5	0.906	61.7	61.2	11.4

2.2 Paramétrage du modèle, portion québécoise du bassin versant

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

Pour les fins de la présente étude, les données à références spatiales suivantes ont été utilisées en support au paramétrage de GÉODEP pour la portion québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche :

- les polygones de la banque de données des cultures assurées ou généralisées de l'année en cours et de l'année précédente (La Financière agricole du Québec, 2017);
- les polygones de la carte écoforestière du Ministère des ressources naturelles du Québec (2010);
- les unités cartographiques des rapports pédologiques de la zone d'étude, de même que leurs propriétés hydro-pédologiques (IRDA, 2018);

- 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 les sous-bassins versants à haute résolution a été réalisée à partir du modèle numérique d'altitude (MNA) dérivé du relevé LiDAR de 1 m de résolution (figure 1b). 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 de calculs hydrologiques. Les directions et les accumulations des parcours de l'eau ont été colligés et regroupés en sous-bassins dont le seuil minimal de superficie a été fixé à 10 ha de la zone d'étude

Pédologie

La figure 1c illustre la distribution spatiale des séries de sol du territoire à l'étude. Globalement, les sols du bassin versant présentent des textures très diversifiées allant des textures sablonneuses dans les secteurs Est et Ouest du bassin, au loam argileux dans sa portion centrale. Chaque polygone de série de sol est documenté dans la banque de données hydro-pédologiques de l'IRDA (2018). Celle-ci décrit les propriétés des sols qui sont mises à profit dans les modules de calcul du ruissellement, de l'érosion et des exportations de phosphore. Les propriétés physico-chimiques des sols (texture, structure, perméabilité, taux de matière organique, teneur en P naturel du sol) de même que l'indexation de leur groupe hydrologique et leur indice d'érodabilité sont au nombre des propriétés déterminantes mises à profit par les algorithmes de calcul de GÉODEP. Enfin, les richesses moyennes des sols en phosphore assimilable (Mehlich-3) et les indices de saturation des sols en P des champs pour chacune des municipalités de la zone d'étude sont tirées de l'étude de Beaudet et al. (2009). Ces résultats de dosages des sols ont été colligés sur la base des rapports d'analyses préparés par les services de laboratoire à l'intention des agriculteurs, en support à l'élaboration de leurs plans de fertilisation des cultures.

Occupation des sols

Le scénario de référence de l'occupation des sols (Figure 1a) a mis à profit deux banques de données à référence spatiale, soit la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD) de l'année en cours et de l'année précédente (La Financière agricole du Québec, 2017), de même que les polygones de la carte écoforestière (SIEF) du Ministère des ressources naturelles du Québec (2010). Les classes détaillées d'occupation agricole (BDPPAD) et d'occupation non-agricole du territoire (SIEF) ont été regroupées en classes généralisées d'occupation, tel qu'illustré en figure 1a, afin de simplifier l'exercice de modélisation hydrologique.

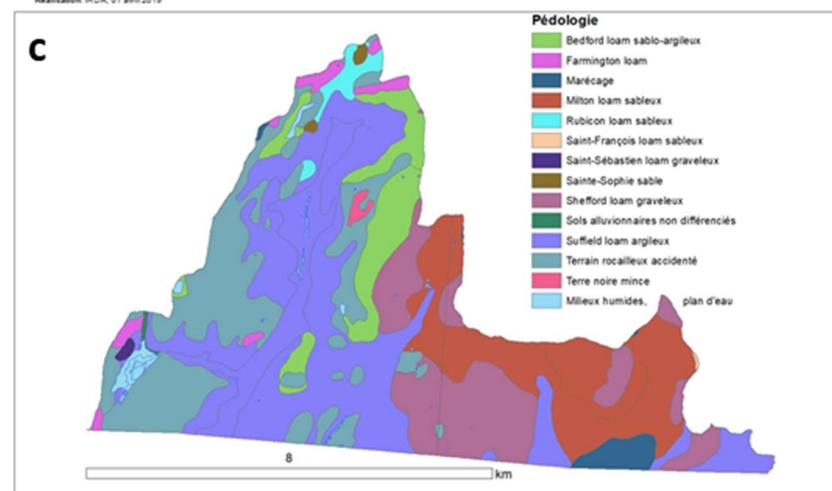
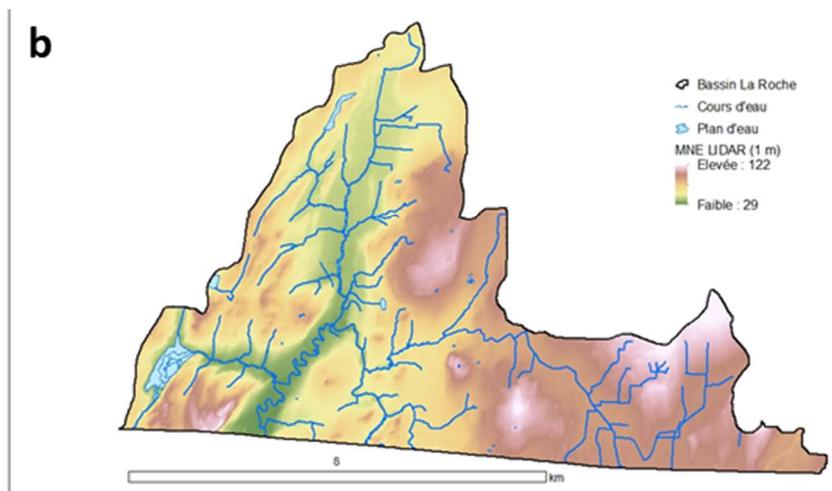
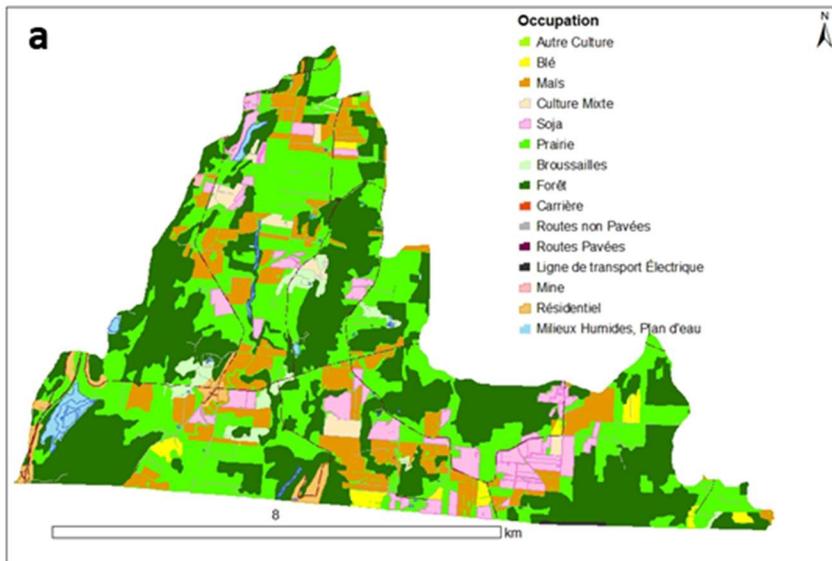


Figure 1. Occupation du sol (a) relief et hydrographie (b), et pédologie (c) de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

Analyse des parcours de l'eau et génération du risque d'érosion

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

La démarche est supportée en plusieurs étapes, telles qu'illustrées en Figure 2. Dans un premier temps, les polygones de parcours de l'eau sont générés par l'intersection spatiale des sous-bassins, des cours d'eau et des fossés (limites des parcelles agricoles, ou réseau de routes). En second lieu, une analyse spatiale des parcours de l'eau dans chacun des polygones de parcours de l'eau permet d'y identifier le parcours de l'eau le plus long. Les statistiques de longueur et d'inclinaison de la pente sont alors générées sur chacun de ces parcours. Ces propriétés de l'écoulement sont par la suite utilisées en intrants dans le calcul du facteur topographique LS, descriptif de la vulnérabilité du relief au processus d'érosion, suivant la méthode proposée par Wall et al. (2002).

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

Scénarios de gestion du parcellaire

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

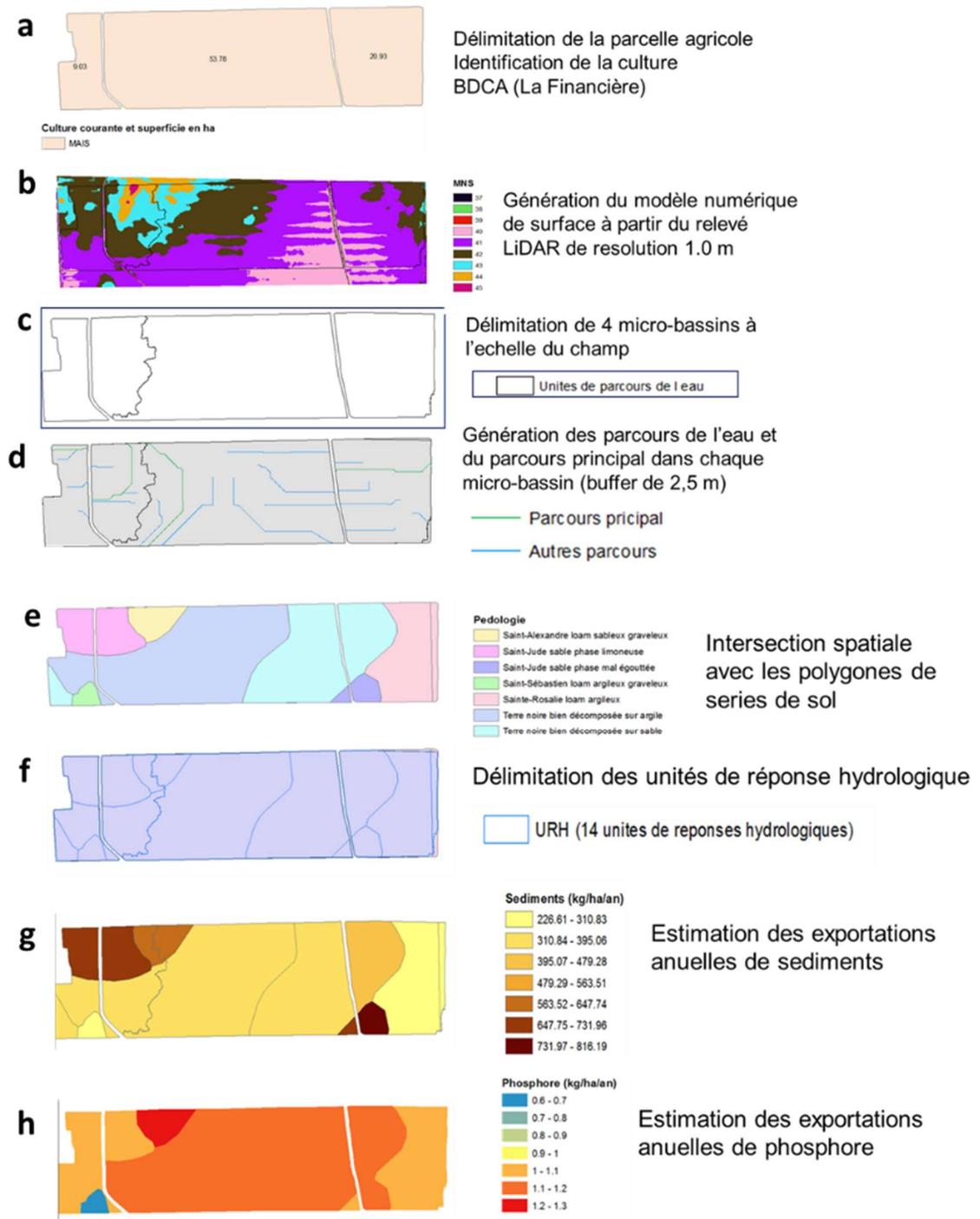


Figure 2. Illustration des différentes étapes de traitement des données à référence spatiale dans GÉODEP pour une portion de territoire à vocation agricole.

Pour les fins de la présente étude, deux scénarios de gestion agricole ont été générés en intrants aux simulations dans GÉODEP pour la portion québécoise du bassin versant, soit :

- un scénario de gestion agricole de référence, présumé représentatif des régies actuelles des champs du bassin versant,
- un scénario alternatif de gestion, ciblé sur l'atteinte d'une réduction de 40% des charges de P exportées de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

Scénario de gestion agricole de référence

La représentation spatiale des cultures du scénario de référence a été générée sur la base des données de la BDCAG (La Financière, 2017) et la carte écoforestière du MRNFP (2010), agrégées en classes principales de cultures (céréales à paille, maïs, prairie et soja). Des itinéraires 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. La culture du maïs sur le loam argileux mal drainé Suffield, par exemple, s'est vu attribuer le labour d'automne comme classe de travail du sol, alors que le loam graveleux Shefford a été plutôt associé à une reprise de travail primaire au printemps. La documentation des régies des sols et des cultures, de même que de l'aménagement des terres du bassin versant de la rivière de la Roche s'est inspirée des données colligées dans le bassin versant voisin de la rivière aux Brochets dans le cadre de différents projets de recherche-action réalisés antérieurement. Sur le plan de la fertilisation phosphatée, les apports en engrais minéraux et en engrais de ferme ont été calés sur la base du bilan global des apports de phosphore estimé par le MELCC (2016) pour la région à l'étude.

Dans l'ensemble, les informations suivantes en lien avec la régie des sols et des cultures ont été documentées pour chacune des 5,884 unités de calcul du méta-modèle sous occupation agricole :

- Culture, saison courante;
- Culture, saison antécédente;
- Présence de culture de couverture suivant la récolte;
- Présence de culture de couverture durant la saison de production;
- Taux d'application de phosphore, engrais minéraux en rang et à la volée;
- Taux d'apports de phosphore des épandages d'engrais de ferme (jusqu'à 3 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 URH 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
- Classes de perméabilité
- Groupe hydrologique
- Matière organique
- Teneur du sol en phosphore, Mehlich-3
- Saturation du sol en aluminium, Mehlich-3
- Teneur naturel en phosphore total
- Longueur maximale du parcours de l'eau
- Pente moyenne du parcours de l'eau

Les tableaux 2 à 4 présentent un portrait d'ensemble de l'aménagement des terres et des régies des sols et des cultures pour l'ensemble des 2,700 ha en culture de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche retenu en scénario de gestion agricole de référence. Dans l'ensemble, 60% de la superficie en cultures est occupée par les prairies (Tableau 2). Les principales cultures annuelles, soit le maïs et le soya, occupent respectivement 23 et 11% de la superficie totale en culture. Pour les fins de la modélisation, les champs du bassin versant en cultures comportant des sols des groupes hydrologiques C et D ont été considérés drainés, alors que les champs associés aux groupes A et B ont été considérés comme non drainés. Globalement, il en résulte que plus de la moitié des superficies en cultures bénéficient de drainage souterrain. Les parcelles en cultures annuelles sont majoritairement drainées (>75%), alors que 37% des superficies en prairie ont été considérées comme drainées.

Tableau 2. Distribution des cultures et des aménagements du drainage souterrain des champs retenue dans le paramétrage du méta-modèle à l'échelle du bassin versant.

Classes de culture	Superficie totale (ha)	Drainage systématique (ha)	Absence (ha)	(% total)
Céréales	142.6	124.7	17.9	87%
Prairie	1 646.6	613.2	1 033.4	37%
Maïs	629.5	491.4	138.1	78%
Soja	310.8	231.8	79.0	75%
Total	2 729.5	1 461.1	1 268.4	54%

En ce qui a trait aux pratiques de travail du sol, la très grande majorité des superficies en cultures de céréales à paille et de soja ont été considérées en culture sans labour (Tableau 3). Pour ce qui est du maïs, 85% de superficies ont été associées à une régie de labour d'automne, reflétant le pourcentage élevé de sols cultivés du groupe hydrologique D.

Tableau 3. Distribution des pratiques de travail du sol pour les cultures annuelles retenue dans le paramétrage du méta-modèle à l'échelle du bassin versant.

Classes de culture	Superficie totale (ha)	Labour Automne (ha)	Déchaumage Printemps (ha)	Semis Direct (ha)	(% en culture sans labour)
Céréales	142.6	4.0	97.0	41.6	97%
Maïs	629.5	533.4	96.1		15%
Soja	310.8		207.1	103.7	100%
Total	1 082.9	537.4	400.2	145.3	50%

Tableau 4. Distribution des superficies d'épandage attribuées par classe de culture retenue dans le paramétrage du méta-modèle à l'échelle du bassin versant.

Classes de culture	Superficie totale (ha)	Superficie d'épandage (ha)	(% total)
Céréales	142.6	142.6	100%
Prairie	1 646.6	874.0	53%
Maïs	629.5	156.6	25%
Soja	310.8	0.0	0%
Total	2 729.5	1 173.3	43%

La teneur en phosphore moyenne des sols en culture du bassin versant a été établie à 157 kg P/ha (Méthode Mehlich III) sur la base de l'étude de Beaudet et al. (2009). Compte tenu des taux variables de la capacité de fixation des sols en P du bassin versant, ce taux de richesse moyen se traduit en un indice de saturation variant de 6.8 à 10%.

En ce qui a trait aux apports en engrais minéraux, des applications de 20 kg P₂O₅ à l'hectare au semis ont été attribués aux cultures annuelles (maïs, soja et céréales) de l'ensemble du bassin versant. Les apports de P des engrais de ferme ont par la suite été attribués aux différentes classes de culture de façon à refléter le bilan des apports en P documenté pour de la région à l'étude (MELCC, 2016). Dans l'ensemble, il a été considéré que 43% des superficies du bassin versant recevaient des engrais de ferme. Le taux d'apports en pré-semis de P provenant des engrais de ferme a été établi à 40 kg P₂O₅ à l'hectare pour les cultures de maïs et de céréales, et à 50 kg P₂O₅ pour les prairies, après coupe en période estivale. Aucun apport en engrais de ferme n'a été attribué au soja. Le tableau 3 rapporte la distribution des superficies d'épandage attribuées par classe de culture.

Sur ces bases, les apports annuels de P pour l'ensemble du bassin ont été établis à 56 et 22 T de P₂O₅ pour les engrais de ferme et les engrais minéraux, respectivement. Le taux moyen d'apport de P correspondant pour l'ensemble des cultures du bassin versant se situe ainsi à 28 kg P₂O₅/ha. Considérant les seules superficies d'épandage, le taux moyen d'apport retenu dans le paramétrage du modèle est de l'ordre de 53 kg P₂O₅/ha, soit précisément le taux estimé sur la base des bilans des apports en P du MELCC (2016).

Scénario alternatif de gestion agricole. Plusieurs scénarios alternatifs de pratiques agricoles et d'aménagements des terres ont été appliqués de façon itérative au parcellaire du bassin versant à l'étude. Concrètement, cette démarche implique de substituer de nouvelles pratiques culturales, aménagements des terres et régies de fertilisation aux données originales du scénario de référence. Dans le cadre de la présente étude, le montage des scénarios alternatifs de gestion a ciblé l'atteinte d'une réduction de l'ordre de 40% de la charge de phosphore projetée dans le scénario de référence. Les considérations qui ont guidé la sélection des pratiques et aménagements retenus dans l'exercice de modélisation du scénario alternatif de gestion sont présentées plus en détails en section suivante (2.4) du présent rapport.

2.3 Résultats de la modélisation GÉODEP pour le scénario de référence de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche

Globalement, à l'échelle du sous-bassin de la rivière de la Roche, les projections de GÉODEP ont été estimées pour plus de 5,803 unités de réponse hydrologique (URH). Les taux d'exportation de sédiments ont été estimés pour l'ensemble des occupations agricole (54% de la superficie du bassin), de même que la portion non agricole du bassin, incluant le milieu forestier (46% de la superficie du bassin versant) et les autres occupations, telles que décrites au Tableau 5. Dans l'ensemble, les flux exportés de sédiments (MES, matières en suspension) et de phosphore total projetés par GÉODEP sont dans l'ordre de grandeur des flux rapportés par Simoneau (2018). Tel que rapporté au Tableau 5, la sommation des flux prédits de sédiments pour l'ensemble des unités de calcul du méta-modèle (URH) de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche se situe à 2,515 T de MES par an. Pour les périodes de 2001 à 2010, puis 2011 à 2017, Simoneau (2018) rapporte des charges (normalisées) de 1,9056 et 2,792 T par an, respectivement. La superficie de référence de Simoneau (2018) est cependant supérieure (5,382 ha) à celle modélisée par GÉODEP (5,022 ha) sur la base des limites de bassin versant délimitées par le data LiDAR. Rapportée à la superficie de référence de GÉODEP, le flux de référence de Simoneau (2018) serait donc de l'ordre de 2,605 T de MES pour la période de 2011-2017, soit 3% supérieure au flux projeté par GÉODEP. Cette comparaison témoigne ainsi d'un excellent ajustement du méta-modèle par rapport aux flux observés de MES.

En ce qui a trait au phosphore, le flux annuel projeté par GÉODEP pour l'ensemble du bassin versant est de 4,29 T de phosphore (Tableau 5), alors que le flux ajusté pour la superficie de Simoneau (2018) pour la période 2011-2017 est 3,22 T de P. L'écart est de l'ordre de 33%. Il demeure difficile d'imputer cette surestimation de GÉODEP à l'un ou l'autre des occupations du territoire. Rappelons ici que les projections de P de l'occupation non agricole du bassin versant ont été fixées sur la base de coefficients d'exportation inspirés de Winchell et al. (2012), alors que les exportations de sédiments ont été projetées par les algorithmes de GÉODEP. Une surestimation des contributions des occupations non agricole, notamment le secteur forestier dont la contribution spécifique a été fixé à 0,14 kg P/ha, a pu contribuer à la surestimation des charges par GÉODEP.

De la même façon, une surestimation des flux provenant de l'occupation agricole du territoire est possible. Compte tenu du bon ajustement du méta-modèle pour les sédiments, l'écart dans les projections de P serait alors imputable au paramétrage de la richesse des sols et de la régie des intrants. Rappelons par ailleurs qu'un écart de 33% se situe bien en deçà de la variabilité interannuelle mesurée dans la rivière. Par exemple, la charge observée de P total à l'aval de la rivière de la Roche varie de 7,56 T en 2015, à 17,53 T en 2011 (Simoneau, 2018), en hausse de 132%. Il est donc estimé qu'un écart de 33% de la charge globale de P projetée avec la charge moyenne observée est acceptable pour les besoins de la présente étude, ciblée sur la projection de l'efficacité relative de scénarios alternatifs de gestion.

Les projections de flux de sédiments par GÉODEP à l'échelle des URH font intervenir la hauteur projetée du ruissellement de surface (Figure 3), 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 représentées par les routes, le milieu forestier et les 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'exportations de sédiments des champs en culture ont été estimées sur la base des indices « C » de GÉODEP pour différentes combinaisons de cultures et de régimes des sols (Michaud et al., 2009).

Les taux d'exportation de phosphore pour le parcellaire agricole (2,729 ha) ont été estimés par les algorithmes de calcul de GÉODEP. Pour les occupations non agricoles du territoire, les coefficients spécifiques d'exportation annuels (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 états-uniennes des bassins des rivières transfrontalières (Québec/Vermont) aux Brochets, Missisquoi et de la Roche, à laquelle l'équipe de l'IRDA a contribué. Les coefficients d'exportation annuels spécifiques retenus expriment la contribution annuelle moyenne en phosphore total des secteurs urbanisés (0,72 kg P/ha), des routes pavées (1,17 kg P/ha) et non pavées (0,78 kg P/ha), de la forêt (0,14 kg P/ha), des milieux humides (0,72 kg P/ha), des friches (0,14 kg P/ha).

Tableau 5. Projections des charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour le scénario de référence.

Classe d'occupation du sol	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	143	82 354	577	183	1.28
Prairie	1 647	301 610	183	1 051	0.64
Maïs	630	1 580 231	2 510	1 983	3.15
Soja	311	394 788	1 270	588	1.89
Total agricole	2 729	2 358 983	864	3 805	1.39
Résidentiel	72	N/D	N/D	52	0.72
Milieux humides	25	457	18	18	0.72
Friches	103	38 088	368	24	0.23
Forêt	1 940	78 344	40	272	0.14
Routes non pavées	71	28 357	401	55	0.78
Routes pavées	55	11 023	201	64	1.17
Eau	27	0	0	0	0.00
Total non agricole	2 292	156 269	68	484	0.21
Total Bassin versant	5 022	2 515 252	501	4 289	0.85

Les figures 3 à 5 illustrent successivement les projections des hauteurs de ruissellement et des exportations spécifiques (sur la base de la superficie) de sédiments et de phosphore total projetées par le modèle GÉODEP pour la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la

Roche, sur la base du scénario de référence. Le tableau 5 présente pour sa part les charges cumulées de sédiments (MES) et de phosphore total estimées pour chacune des classes d'occupation du territoire à l'échelle du bassin versant.

Les figures 6 et 7 illustrent pour leur part la distribution, à l'échelle des URH (unités de réponse hydrologiques) des taux de ruissellement, des facteurs topographiques (LS), de même que des charges spécifiques de sédiments et de phosphore projetés pour les portions agricoles du sous-bassin versant de la rivière de la Roche. Cette représentation des projections du méta-modèle, illustrées en figure 3 à 5, exprime bien le pouvoir explicatif des principaux facteurs déterminants de GÉODEP. Conceptuellement, ces facteurs expriment les deux principaux vecteurs d'exportation du P, soit les facteurs *Source* et les facteurs *Transport*. Rappelons que les *Sources* de P utilisées en intrants par le méta-modèle sont le stock de P contenu dans les sols (exprimé par la richesse et la saturation du sol en P), de même que les apports annuels en engrais de ferme (fumiers et lisiers) et en engrais minéraux. Les facteurs déterminants du *Transport*, associés au ruissellement de surface à l'érosion, sont pour leur part déterminés par les propriétés des sols (infiltration et érodabilité), le relief (longueur et inclinaison des parcours de l'eau) et la couverture de la surface du sol (par les résidus ou par les plantes).

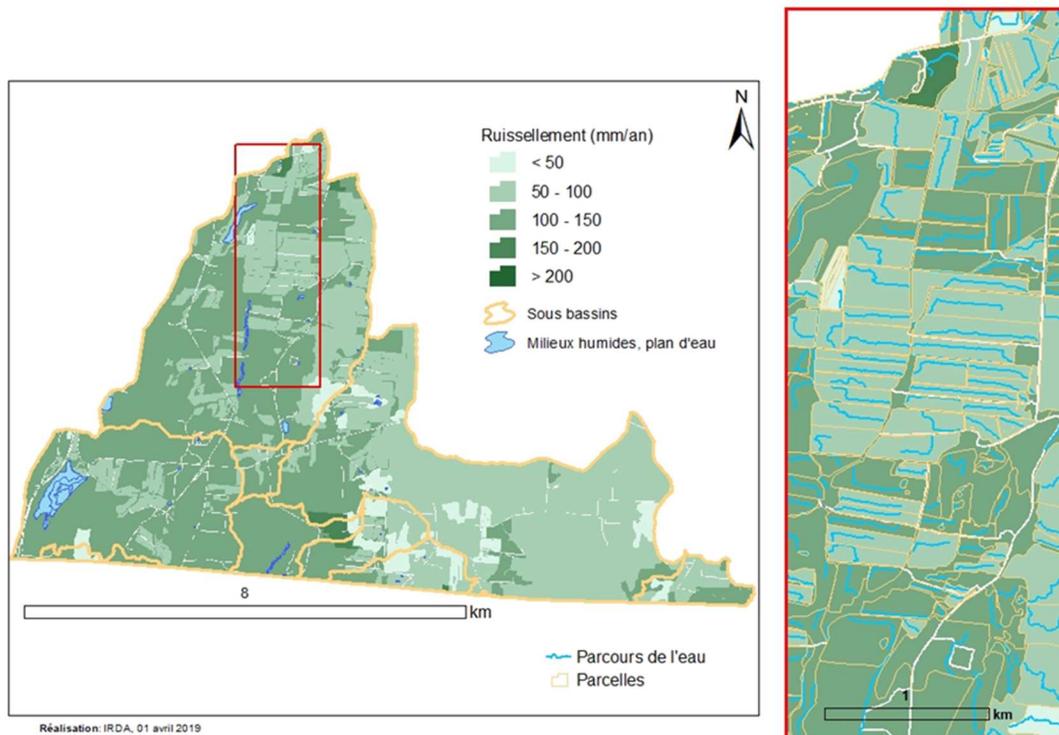


Figure 3. Projections de la hauteur de ruissellement de surface de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour le scénario de référence.

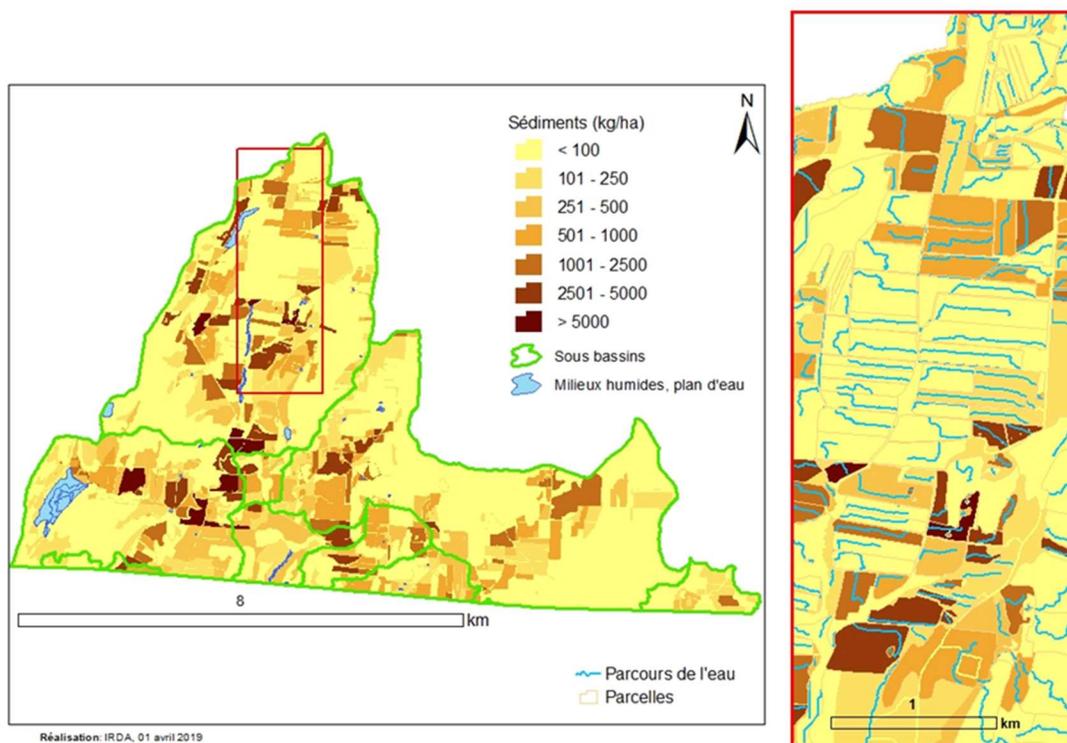


Figure 4. Projections de la charge spécifique de sédiments de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour le scénario de référence.

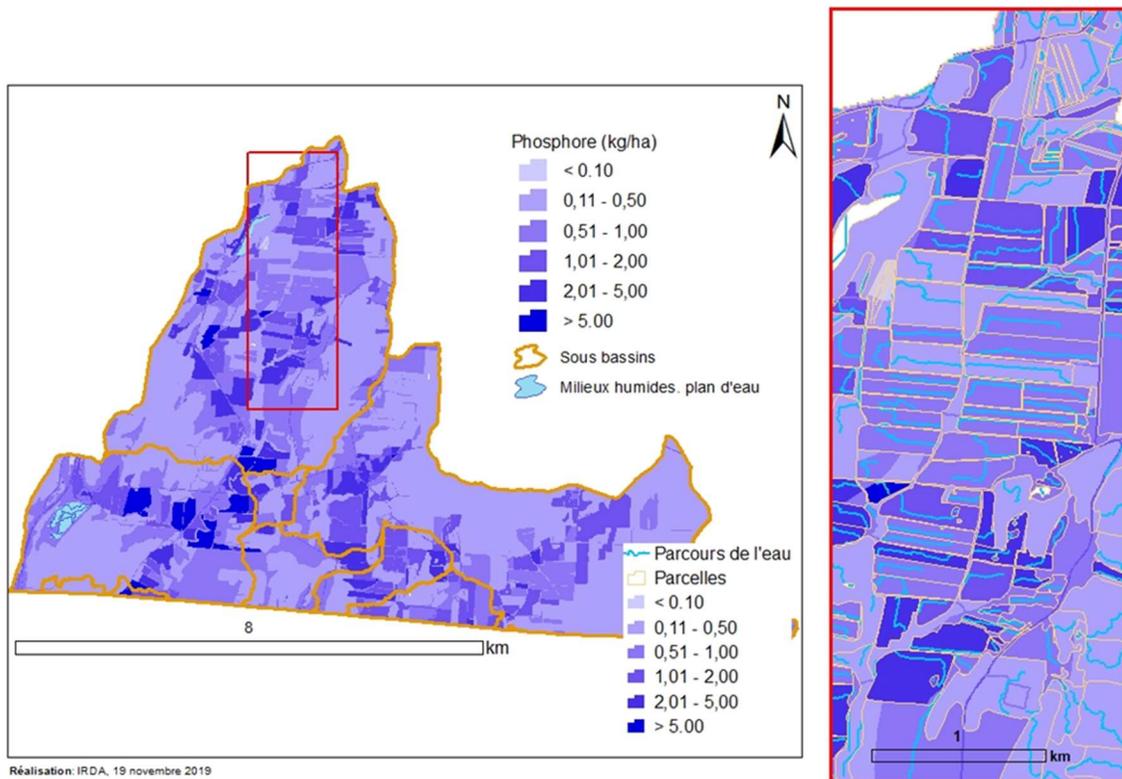


Figure 5. Projections de la charge spécifique de phosphore de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour le scénario de référence.

La figure 6 illustre la distribution des taux d'exportation de sédiments en fonction des taux projetés de ruissellement de surface par GÉODEP et du relief (LS : facteur d'inclinaison et de longueur de parcours de l'eau). Dans l'ensemble, les taux de ruissellement projetés varient de 35 à 172 mm par an. Cette forte disparité traduit en premier lieu la classification des groupes hydrologiques des sols du bassin versant prise en compte dans le modèle et exprimée suivant la méthode de Gagné et al., (2013). La présence de drainage de drainage souterrain systématique ou partiel, la classe du drainage de surface et de la condition du sol documentée dans GÉODEP (Michaud et al., 2009) contribuent aussi à moduler le taux de ruissellement de surface projeté par GÉODEP. Bien qu'une tendance à l'augmentation du taux d'exportation de sédiments soit suggérée en réponse à l'accroissement du taux de ruissellement, la figure 3a met en relief que l'exportation de sédiments varie considérablement pour un taux de ruissellement donné. Cette dispersion dans les taux projetés d'exportation de sédiments reflète les effets cumulés du relief, des propriétés des sols et de la régie de la parcelle pris en compte dans le modèle. Il s'en suit une forte discrimination des taux projetés de pertes de sédiments, d'une valeur pratiquement nulle, par exemple, sur un terrain plat, très perméable (groupe hydrologique « A »), drainé et en prairie, à près de 10 tonnes de sédiments par hectare, sur des sols peu perméables, en culture annuelle sans pratique culturale anti-érosive, et suivant de longs parcours de l'eau et/ou de fortes pentes. La figure 3 b illustre pour sa part l'effet déterminant du relief sur la vulnérabilité du parcellaire agricole à l'érosion dans la région à l'étude. Pour une même culture de soja par exemple, la charge de sédiments projetée varie de 165 kg MES/ha en terrain plat à 9,100 kg MES/ha sur un terrain présentant de longues pentes inclinées.

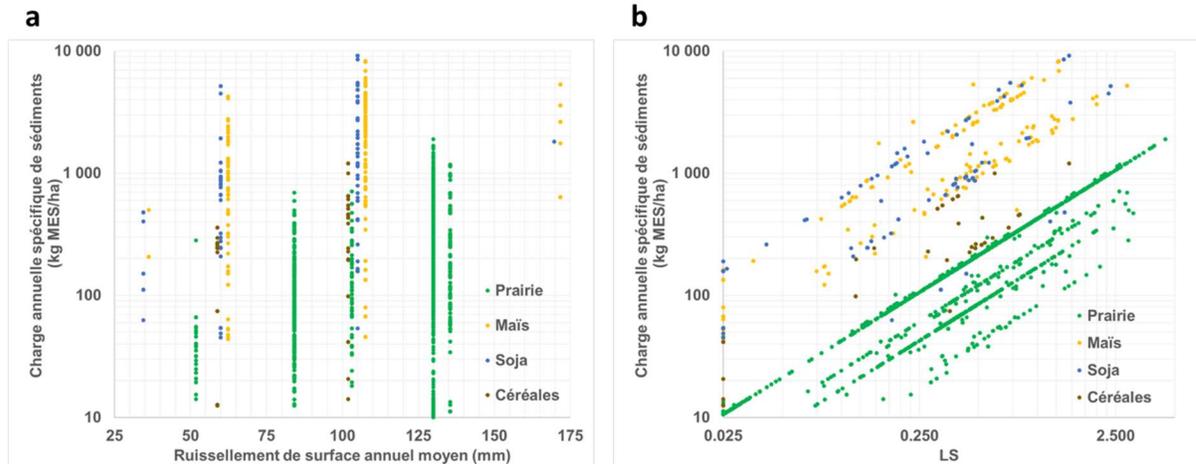


Figure 6. Projections des taux spécifiques d'exportation de sédiments des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche en fonction de la hauteur du ruissellement de surface (a) et du facteur topographique LS (b).

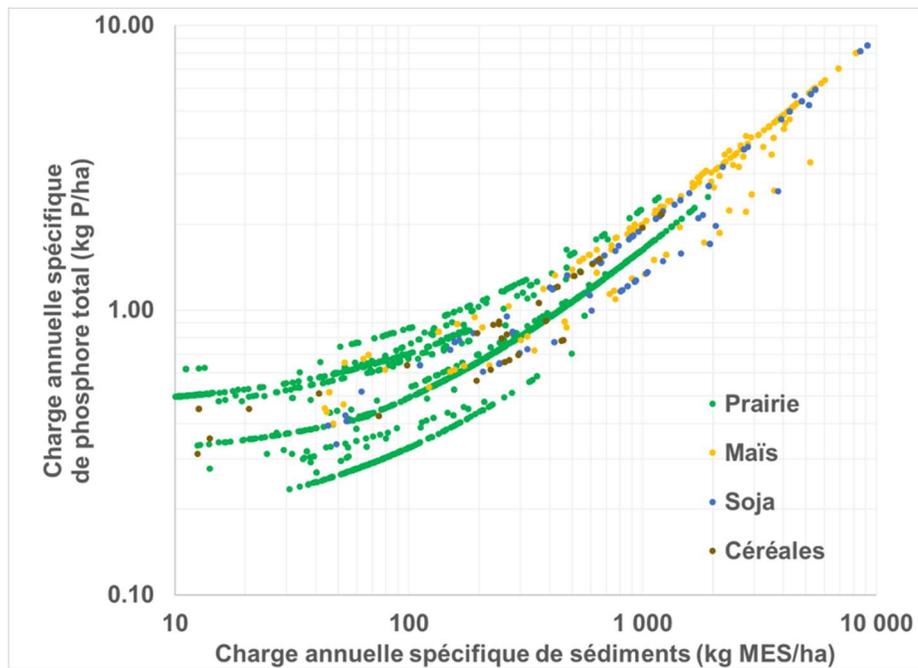


Figure 7. Projections des taux spécifiques d'exportation de phosphore des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche en fonction du taux d'exportation de sédiments.

Dans l'ensemble, les taux d'érosion les plus élevés de la zone d'étude sont associés aux cultures annuelles (soja, maïs et céréales à paille) cultivées sur un relief en pente, exprimé par des valeurs élevés de facteur topographique LS dans le modèle GÉODEP. La culture du soja est associée au taux d'exportation de sédiments le plus élevé, soit 1,27 tonne de sédiments par an en moyenne à l'échelle du bassin versant (Tableau 5). La faible protection anti-érosive offerte par des résidus de culture peu abondants explique cette projection de vulnérabilité aux processus érosifs. Celle-ci est cependant fortement modulée par les propriétés des sols et du relief, de même que par l'aménagement des terres. Le paysage du bassin versant offre en effet une large gamme de pentes et de longueurs de parcours de l'eau, qui contribue à l'importante variabilité de perte de sol pour un type de sol et de culture donnés. En production de foin, cette variabilité dans les projections de pertes de sol est aussi tributaire de l'année de rotation, reflétant ou non, un labour de la prairie l'automne précédent.

En ce qui a trait au phosphore, les résultats du suivi hydrométrique du MELCC (2018) indique que la plus large part de la charge de phosphore observée dans la rivière de la Roche est de nature particulière. Cette corrélation entre le taux de perte de sédiments et de phosphore est clairement exprimée par les projections de GÉODEP à l'échelle du bassin, tel qu'illustré en figure 7. En clair, la portion la plus vulnérable du parcellaire en culture à l'érosion est aussi associée à l'exportation spécifique la plus élevée de phosphore. Il n'est donc pas surprenant de constater que les superficies en culture de maïs sous labour (3,15 kg P/ha) et de soja (1,89 kg P/ha) sont associées aux taux moyens les plus élevés de perte de phosphore (Tableau 5).

Bien que la distribution des taux spécifiques d'exportation de P (Figure 7) illustre bien la corrélation entre les taux projetés de pertes de sol et de phosphore, elle met aussi en relief une variabilité importante de la perte projetée de P pour une classe de culture donnée et présentant un taux d'érosion similaire. Conceptuellement, cette variabilité de l'exportation de P, à taux constant de perte de sol, illustre l'influence des facteurs *Sources* pris en compte dans le modèle GÉODEP. Dans l'ensemble, la dispersion modérée des pertes de P pour un taux de perte de sol donné dans les cultures annuelles reflètent le taux fixe de richesse de sol en P retenu dans le paramétrage du méta-modèle. 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. Retenons que l'absence de données à l'échelle parcellaire dans le cadre de la présente étude ne permet pas de projeter l'influence de cet important facteur déterminant du flux de P.

En ce qui a trait à l'influence des apports de P, rappelons que les algorithmes du modèle attribuent un effet aux apports d'engrais que dans le seul cas où ceux-ci ne sont pas incorporés au sol. Cette hypothèse reflète le consensus dans la littérature scientifique que l'incorporation des engrais annule à toute 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, non retournée dans l'année, ont vu leur richesse en P du ruissellement de surface ajustée en réponse à l'épandage d'engrais de ferme non incorporé, suivant les algorithmes du modèle. Une superficie d'épandage de 874 ha a ainsi été considérée (53% des superficies en prairie, Tableau 4) par les algorithmes du modèle déterminants de l'enrichissement du P dans le ruissellement de surface. Cet effet de l'épandage d'engrais de ferme (ou non) est bien exprimé par la disparité dans les flux projetés de P pour les prairies, telle que présentée en figure 7. 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.

Rappelons que cette fonction d'enrichissement du ruissellement en P a été développée sur la base d'observations générées en conditions contrôlées sous pluie simulée sur des champs en Montérégie (N=36). Le dispositif a permis de comparer l'effet de l'application engrais de ferme sur des prairies ou des sols nus par rapport à une parcelle Témoin sans apport d'engrais. L'enrichissement du ruissellement en phosphore réactif soluble liée à l'apport d'engrais de ferme s'est avéré déterminé par la richesse du sol en P, alors que l'état de surface (sol nu vs prairie) ou les autres propriétés du sol ne contribuaient que marginalement à expliquer l'effet de l'apport de l'engrais de ferme. Pour plus d'information sur les algorithmes retenus dans GéODEP dans l'expression de l'effet des apports non incorporés d'engrais de ferme, le lecteur est invité à consulter l'annexe II du présent rapport de même que les résultats originaux de l'expérience publiés par Michaud et Laverdière (2004).

Au global, la forte dispersion des taux prédits de pertes de sol et de P par GéODEP en fonction de chacune des principales variables d'entrées, prises individuellement, reflète que les processus érosifs et de mobilisation de P découlent d'effets et d'interactions de plusieurs facteurs. A sa plus simple expression, la vulnérabilité d'une parcelle agricole donnée est révélée 1) par ses sources de phosphore, qu'elles soient stockées (richesse du sol) ou apportées (apports d'engrais de ferme et minéraux) et 2) les différents facteurs de mobilisation (ruissellement et érosion).

Une implication pratique des résultats de la modélisation GéODEP appliquée à la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche est la nécessaire prise en compte de l'ensemble des sources et facteurs de transport dans l'appréhension de la vulnérabilité du territoire aux exportations de phosphore. Il en sera de même pour les retombées environnementales de scénarios alternatifs de gestion du parcellaire agricole. L'introduction d'une nouvelle pratique culturale ou d'un nouvel aménagement des terres verra son effet sur l'exportation de P, au final, déterminée par les propriétés des sols, du paysage et du système de culture. L'introduction du semis direct, par exemple, exacerbera la perte de phosphore sur des champs où les engrais de ferme ne sont pas incorporés (effet antagoniste). De la même façon, le cumul de plusieurs pratiques agroenvironnementales pourra se traduire en effets synergiques. Une discussion plus détaillée de ces interactions et de leurs implications opérationnelles est proposée par Martel et al. (2006).

2.4 Résultats de la modélisation GéODEP et analyse économique du scénario alternatif de gestion agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche

Cette section du rapport présente les flux de sédiments et de phosphore projetés par GéODEP en réponse au scénario alternatif de gestion agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche, de même que l'estimation des coûts associés à sa mise en œuvre. Rappelons que le méta-modèle GéODEP permet à l'utilisateur de projeter, pour un champ donné, l'effet cumulatif de plusieurs pratiques alternatives, et ce dans le contexte de régie et de propriétés des sols propre à chacun des champs de la région d'étude (unités de réponses hydrologiques : URH). La démarche de modélisation du scénario alternatif de gestion a donc consisté à modifier les paramètres de gestion des différentes URH, sans toutefois changer leurs propriétés géophysiques, telles que la nature des sols, du relief ou de la présence de drainage souterrain. Il est ainsi permis de projeter, pour un ensemble de champs ciblés, la réduction des exportations de sédiments et de phosphore suivant une ou une combinaison de pratiques alternatives de gestion.

L'élaboration du scénario alternatif de gestion du territoire agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche a ciblée l'atteinte d'une réduction globale de 40% du flux annuel de phosphore. Le scénario de gestion retenu intègre des pratiques alternatives de régie des sols et des cultures, de nouveaux aménagements des champs, des rives et des cours d'eau, de même que des changements de vocation de zones du bassin versant particulièrement vulnérables, soit en raison de leur inondabilité ou de la sévérité des processus d'érosion.

Trois mises en garde s'imposent ici à l'égard des projections générées par le modèle :

- D'abord, la combinaison de scénarios retenus dans le cadre de la présente étude doit être considérée à titre indicatif. Dans les faits, une multitude de scénarios de régie et d'aménagement peut être généré par l'utilisateur du méta-modèle permettant d'atteindre, en théorie, la cible retenue de 40% de réduction de flux de P. Il n'appartient pas aux auteurs de la présente étude de dicter les actions environnementales d'une éventuelle action concertée de mise en valeur du bassin versant de la rivière de la Roche. Le système d'information développée dans le cadre du présent projet demeure un outil destiné à appuyer la concertation et la planification d'actions agroenvironnementales qui allient performance technique, acceptabilité sociale et faisabilité économique.
- La deuxième mise en garde concerne les projections des réponses de la qualité de l'eau aux pratiques agricoles et aménagements des terres estimées par le méta-modèle GÉODEP, qui doivent aussi être considérées à titre indicatif. Certes, les charges globales de sédiments et de phosphore projetées par GÉODEP en scénario de référence, tant au Québec qu'au Vermont, sont représentatives des données de suivi hydrométrique colligées à l'amont et à l'aval du bassin versant. Cependant, nous ne disposons pas de telles balises (données de suivi hydrométrique) pour valider des projections de taux d'érosion ou d'exportation de phosphore en réponse à des scénarios alternatifs de gestion. Rappelons que les projections issues des algorithmes de GÉODEP reflètent l'état des connaissances en matière d'hydrologie et d'agronomie, inspirées d'études réalisées au Québec aux échelles de la parcelle, du champ ou du bassin versant. La documentation des efficacités environnementales des scénarios alternatifs de régie des sols demeure cependant limitée pour les conditions agro-climatiques propres au Québec et constitue encore aujourd'hui une importante priorité de recherche. Il est à souhaiter que les algorithmes de GÉODEP puissent s'enrichir, dans un avenir rapproché, de nouvelles observations quantifiant l'efficacité environnementale des pratiques agricoles de conservation des sols et de l'eau dans le contexte spécifique du climat, de l'aménagement des terres et des systèmes culturaux et d'élevage propres au Québec.
- En troisième lieu, le lecteur doit garder à l'esprit la finalité d'une analyse coût : efficacité (ACE). Ce type d'analyse ne mène pas forcément à une sélection de la meilleure alternative quant aux coûts et aux bénéfices des différentes options. L'ACE guide plutôt le décideur, public ou privé, vers l'option la moins coûteuse pour obtenir un résultat voulu, la réduction des flux de phosphore dans le cas présent. Ainsi, l'ACE peut être un outil des plus valables lorsqu'un objectif non-financier est établi d'emblée et que l'on cherche à connaître la solution la moins coûteuse pour atteindre cet objectif. Dans le cas présent, l'objectif déjà établi est celui de réduction de la charge en P de 40 %. L'ACE se distingue donc d'autres approches, comme l'analyse coûts : bénéfices (ACB). L'ACB consiste en une approche d'analyse beaucoup plus globale où tous les coûts et tous les bénéfices sont pris en compte. Ainsi, par exemple, on inclura dans une ACB les bénéfices publics associés à une réduction de la charge en P de 40 % (ex. : réduction des coûts de

traitement de l'eau potable, hausse des revenus des usages récréatifs des plans d'eau, etc.). Par ailleurs, le lecteur doit garder à l'esprit que les résultats de l'ACE sont surtout à titre indicatif. En effet, les montants utilisés par intervention proviennent tous de sources génériques et non pas des fermes particulières qui auraient à implanter ces interventions. Par exemple, le coût de l'opération culturale de labour provient d'une source générique (CRAAQ, 2018) et il peut varier d'une ferme à l'autre.

Compte tenu du portrait agroenvironnemental généré en scénario de référence, le scénario alternatif de gestion a retenu quatre principaux objectifs, soit :

- La réduction des taux d'érosion. Le relief incliné du bassin versant, l'érodabilité élevée de certaines séries de sol et l'importance des cultures annuelles contribuent à la vulnérabilité élevée de certains secteurs de la région d'étude aux processus d'érosion. Des cultures de couverture sont systématiquement implantées dans le soja, alors que le déchaumage printanier ou le semis direct protègent les champs de maïs labourés à l'automne.
- L'incorporation superficielle des engrais de ferme. Les superficies en prairies ont été ciblées par cette mesure. Cette pratique vise à éviter que des engrais de ferme soient laissés en surface du sol et contribuent à l'enrichissement du ruissellement de surface en P.
- La protection des zones riveraines. Des bandes de trois mètres ont été attribuées aux cultures annuelles, de même que l'aménagement systématique de structures de captage et de sédimentation.
- La protection des zones inondables ou excessivement vulnérables à l'érosion. Les superficies en culture dans le corridor d'inondabilité de la rivière ou dans les zones du bassin versant au relief fortement incliné ont été retournées au milieu naturel.

Les tableaux 6a et 6b rapportent les résultats de réductions de charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol pour la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche résultant de l'application du scénario alternatif de gestion agricole. Une approche itérative retenue dans l'introduction des pratiques individuelles de gestion dans le méta-modèle permet de comparer leurs effets simples, de même que leurs effets cumulés sur les charges de sédiments et de phosphore par classe de culture pour l'ensemble de la portion agricole du bassin versant en territoire Québécois. Au global, le cumul des pratiques alternatives de régie du parcellaire et d'aménagement des terres se traduit en une réduction des flux de sédiments projetée par GÉODEP de l'ordre 58%, et d'une réduction de 40% des flux de P pour l'ensemble de la zone d'étude. Les réductions projetées les plus importantes sont associées aux cultures de soja, soit dans l'ordre de 73% pour les sédiments (MES) et de 55% pour le phosphore. Pour le maïs, les réductions projetées sont de l'ordre de 66% pour les sédiments et de 52% pour le phosphore. Ces projections de taux élevés de réduction des charges de MES et de P reflètent la vulnérabilité élevée des superficies en soja et en maïs grain au processus d'érosion, telle que révélée par la modélisation du scénario de gestion de référence.

Les effets du scénario alternatif de gestion demeurent toutefois fortement discriminés sur le plan spatial, tel qu'illustré en figures 8 et 9 comparant les projections de charges de sédiments et de phosphore des scénarios de référence et alternatif. Cette disparité reflète en large partie le patron spatial de la vulnérabilité du parcellaire agricole projetée dans le scénario de référence, où 50% de la charge de phosphore est associée à 16% de la superficie en culture. La figure 9 compare la distribution des flux projetés de phosphore sur la base de la superficie, tant pour le scénario de

référence, que pour celui résultant du scénario alternatif de gestion. Une implication pratique de cette représentation est tout l'intérêt de cibler les superficies les plus vulnérables dans la planification de pratiques alternatives de gestion afin d'en optimiser les retombées sur le plan environnemental.

Les sections suivantes du rapport commentent, une à une, les effets des pratiques alternatives retenues au scénario alternatif de gestion, de même que leur combinaison, sur les charges de sédiments et de phosphore. Les sources de données et l'approche retenue pour l'estimation des coûts associées à chacune des pratiques retenues au scénario alternatif de gestion du bassin versant sont également présentées. Dans l'ensemble, les coûts ont été projetés sur la base de données et d'études principalement réalisées au Québec. La mise en relation de ces coûts d'implantation avec les efficacités projetées des pratiques sur l'atténuation des charges de sédiments et de phosphore permet de projeter des *ratios coût : efficacité* associés à chacune des pratiques de gestion alternative sur une base spécifique, soit en unités de charge de sédiments ou de phosphore réduite par unité de superficie en culture (\$/kg de P et \$/kg de MES).

Tableau 6a. Projections des scénarios alternatifs de gestion sur les exportations globales de sédiments et de phosphore par classe d'utilisation du sol à l'exutoire du bassin et sur la base de la superficie traitée de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

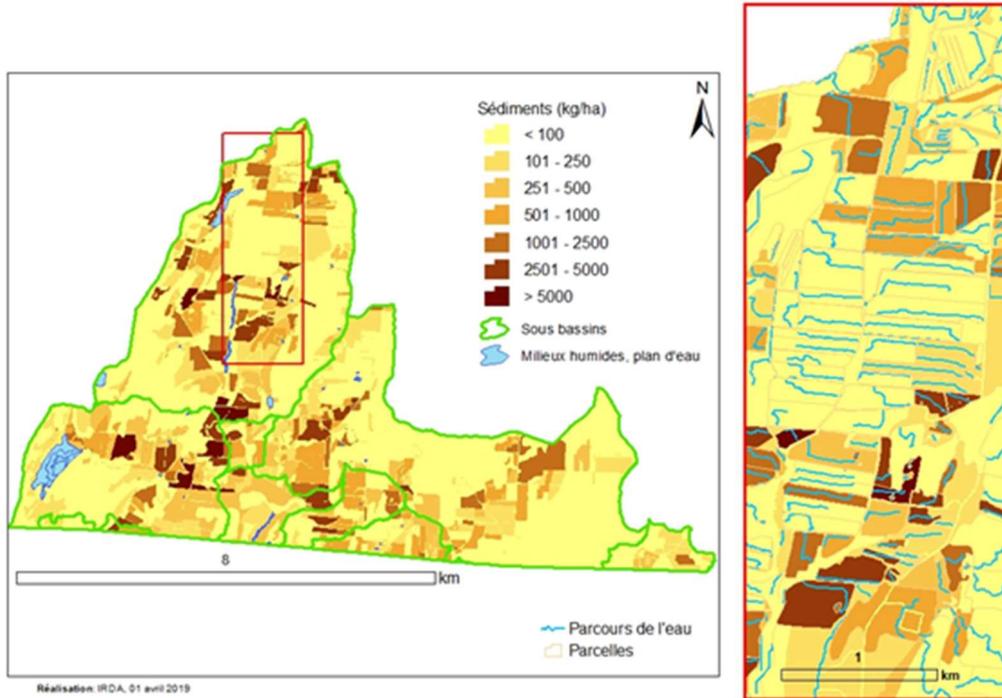
Scénario de gestion agricole	Estimations sur la base de la superficie agricole totale du bassin						Estimations sur la base de la superficie agricole traitée							
	Céréales	Prairie	Maïs	Soja	Total	Superficie agricole traitée (%)	Taux relatif de réduction de la charge du bassin (%)	Charge de référence (kg)	Charge résultante (kg)	Réduction massique de la charge (kg)	Taux spécifique de la charge de référence (kg/ha)	Taux spécifique de la charge résultante (kg/ha)	Taux spécifique de réduction de la charge (kg/ha)	Taux relatif de réduction de la charge (%)
Scénario de référence														
Superficie totale	143	1 647	630	311	2 729	0%								
Charge de référence en P (kg)	183	1 051	1 983	588	3 805		0%							
Charge de référence en MES (kg)	82 354	301 610	1 580 231	394 788	2 358 983		0%							
Bassins de captage et de sédimentation (ha)														
Superficie traitée (ha)	143	0	630	311	1 083	40%								
Charge résultante en P (kg)	163	1 051	1 731	517	3 462		-9%	P	2 754	2 411	-343	2.54	2.23	-0.32
Charge résultante en MES (kg)	70 413	301 610	1 351 097	337 544	2 060 663		-13%	MES	2 057 373	1 759 054	-298 319	1 900	1 624	-275
Bandes riveraines élargies														
Superficie traitée (ha)	143	0	630	311	1 083	40%								
Charge résultante en P (kg)	170	1 051	1 827	544	3 592		-6%		2 754	2 541	-213	2.54	2.35	-0.20
Charge résultante en MES (kg)	74 942	301 610	1 438 010	359 257	2 173 819		-8%		2 057 373	1 872 209	-185 164	1 900	1 729	-171
Bandes riveraines élargies + Bassin de captage														
Superficie traitée (ha)	143	0	630	311	1 083	40%								
Charge résultante en P (kg)	152	1 051	1 598	478	3 280		-14%	P	2 754	2 229	-525	2.54	2.06	-0.48
Charge résultante en MES (kg)	64 076	301 610	1 229 499	307 165	1 902 349		-19%	MES	2 057 373	1 600 739	-456 634	1 900	1 478	-422
Culture sur résidus (maïs)														
Superficie traitée (ha)	0	0	533	0	630	20%								
Charge résultante en P (kg)	183	1 051	1 424	588	3 246		-15%	P	1 983	1 424	-559	3.72	2.67	-1.05
Charge résultante en MES (kg)	82 354	301 610	929 961	394 788	1 708 712		-28%	MES	1 580 231	929 961	-650 270	2 510	1 477	-1 033
Cultures de couverture (soja)														
Superficie traitée (ha)	0	0	0	311	311	11%								
Charge résultante en P (kg)	183	1 051	1 983	366	3 583		-6%	P	588	366	-222	1.89	1.18	-0.71
Charge résultante en MES (kg)	82 354	301 610	1 580 231	178 335	2 142 530		-9%	MES	394 788	178 335	-216 453	1 270	574	-697
Pratiques culturales + Bandes riveraines + Bassins de captage														
Superficie traitée (ha)	143	0	630	311	1 083	40%								
Charge résultante en P (kg)	152	1 051	1 163	306	2 672		-30%	P	2 754	1 621	-1 132	2.54	1.50	-1.05
Charge résultante en MES (kg)	64 076	301 610	723 556	138 754	1 227 995		-48%	MES	2 057 373	926 385	-1 130 988	1 900	855	-1 044

Tableau 6b. Projections des scénarios alternatifs de gestion sur les exportations globales de sédiments et de phosphore par classe d'utilisation du sol à l'exutoire du bassin et sur la base de la superficie traitée de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche (suite).

Scénario de gestion agricole	Estimations sur la base de la superficie agricole totale du bassin						Taux relatif de réduction de la charge du bassin	Charge de référence (kg)	Charge résultante (kg)	Réduction massique de la charge (kg)	Taux spécifique de la charge de référence (kg/ha)	Taux spécifique de la charge résultante (kg/ha)	Taux spécifique de réduction de la charge (kg/ha)	Taux relatif de réduction de la charge (%)
	Céréales	Prairie	Maïs	Soja	Total	Superficie agricole traitée (%)								
Scénario de référence														
Superficie totale	143	1 647	630	311	2 729	0%								
Charge de référence en P (kg)	183	1 051	1 983	588	3 805		0%							
Charge de référence en MES (kg)	82 354	301 610	1 580 231	394 788	2 358 983		0%							
Conversions des prairies en zones critiques														
Superficie traitée (ha)	0	52	0	0	52	2%								
Charge résultante en P (kg)	183	900	1 983	588	3 654		-4%	P	50	7	-42	0.96	0.14	-0.82
Charge résultante en MES (kg)	82 354	276 744	1 580 231	394 788	2 334 117		-1%	MES	24 865	5 250	-19 615	482	102	-380
Conversions des cultures dans le corridor d'inondabilité														
Superficie traitée (ha)	3	34	18	2	58	2%								
Charge résultante en P (kg)	179	1 031	1 918	580	3 708		-3%	P	96	8	-88	1.66	0.14	-1.52
Charge résultante en MES (kg)	80 562	296 975	1 529 278	387 324	2 294 138		-3%	MES	64 561	1 463	-63 099	1 113	25	-1 088
Incorporation des engrais de ferme														
Superficie traitée (ha)	0	841	0	0	841	31%								
Charge résultante en P (kg)	183	923	1 983	588	3 677		-3%	P	505	386	-119	0.58	0.46	0.12
Charge résultante en MES (kg)	82 301	301 610	1 580 231	394 788	2 358 930		0%	MES	201 875	201 875	0	231	231	0
Conversions des cultures annuelles vulnérables														
Superficie traitée (ha)	0	0	39	10	50	2%								
Charge résultante en P (kg)	183	1 098	1 649	510	3 440		-10%	P	412	41	-371	8.32	0.82	-7.50
Charge résultante en MES (kg)	82 354	318 644	1 238 778	313 692	1 953 468		-17%	MES	422 549	13 254	-409 295	8 535	268	-8 267
Cumul de tous les scénarios (à l'exception de la conversion de grandes cultures)														
Superficie traitée (ha)	143	927	630	311	2 010	74%								
Charge résultante en P (kg)	149	882	1 125	302	2 458		-35%							
Charge résultante en MES (kg)	62 681	272 635	699 753	136 095	1 171 165		-50%							
Cumul de tous les scénarios (incluant la conversion de grandes cultures)														
Superficie traitée (ha)	143	927	630	311	2 010	74%								
Charge résultante en P (kg)	147	923	943	265	2 277		-40%							
Charge résultante en MES (kg)	61 177	285 889	540 484	107 213	994 764		-58%							

Exportation de sédiments du bassin La Roche

Scénario de référence 2018



Exportation de sédiments du bassin La Roche

Scénario alternatif

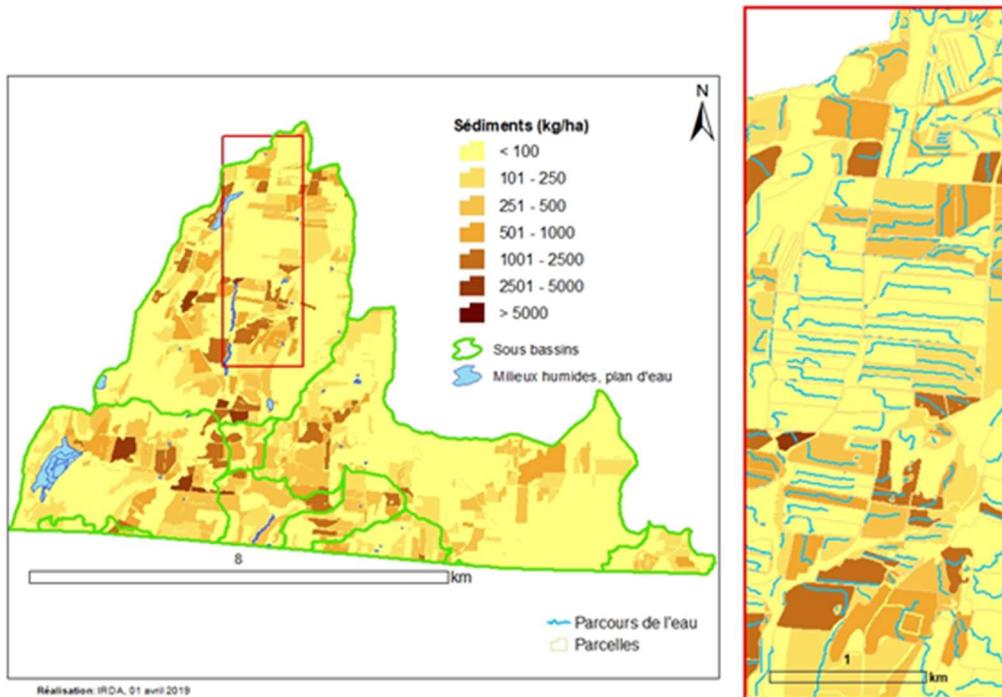
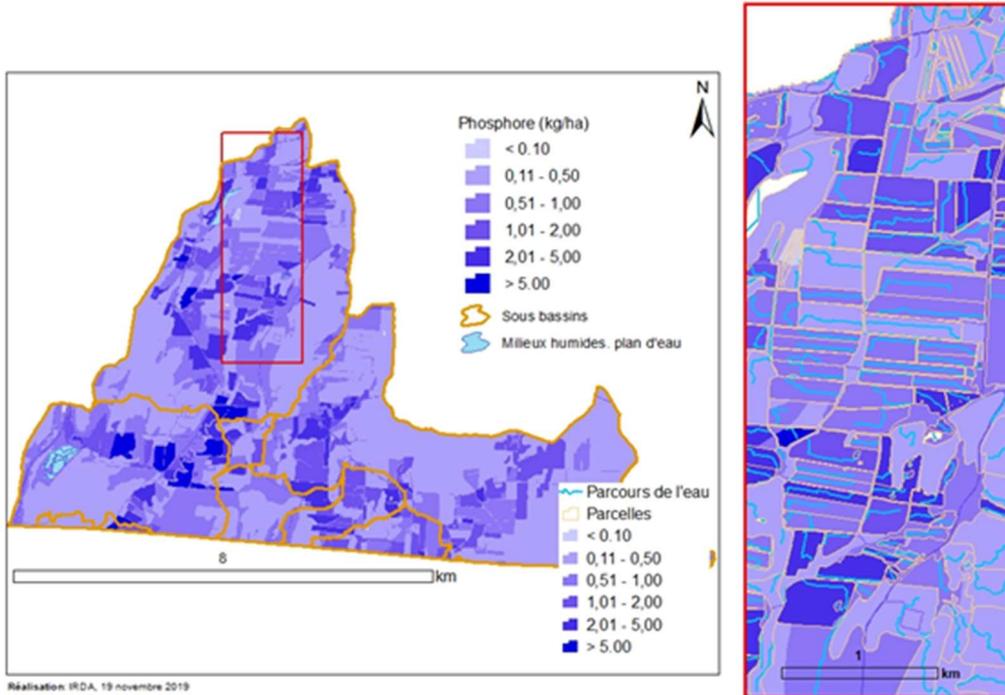


Figure 8. Projections de la charge spécifique de sédiments de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour les scénarios alternatifs et de référence.

Exportation de phosphore du bassin La Roche

Scénario de référence 2018



Exportation de phosphore du bassin La Roche

Scénario alternatif

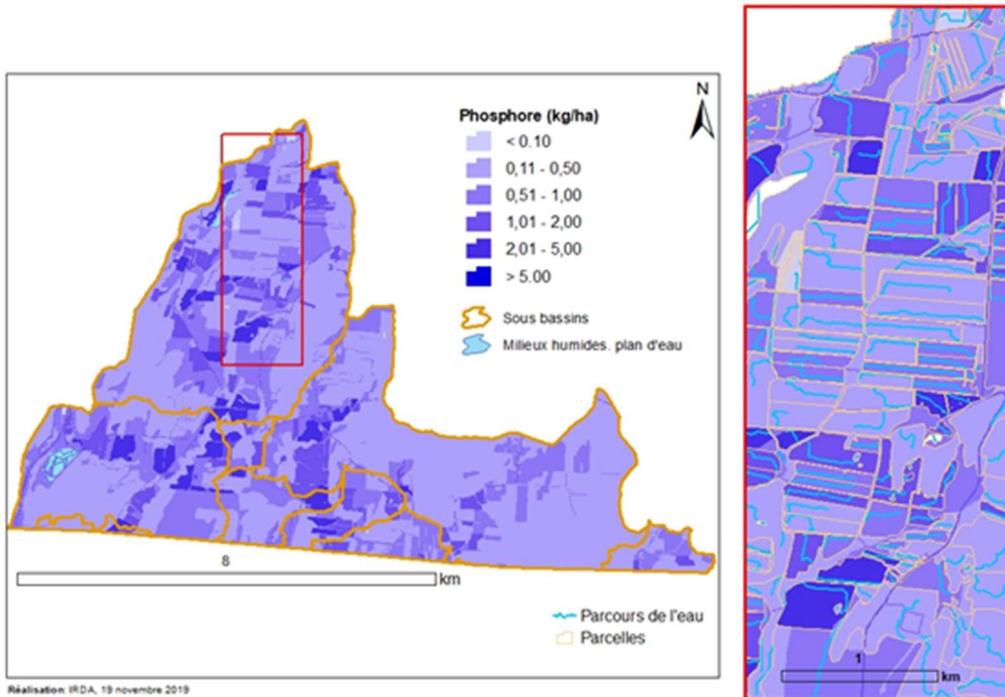


Figure 9. Projections de la charge spécifique de phosphore de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour les scénarios alternatifs et de référence.

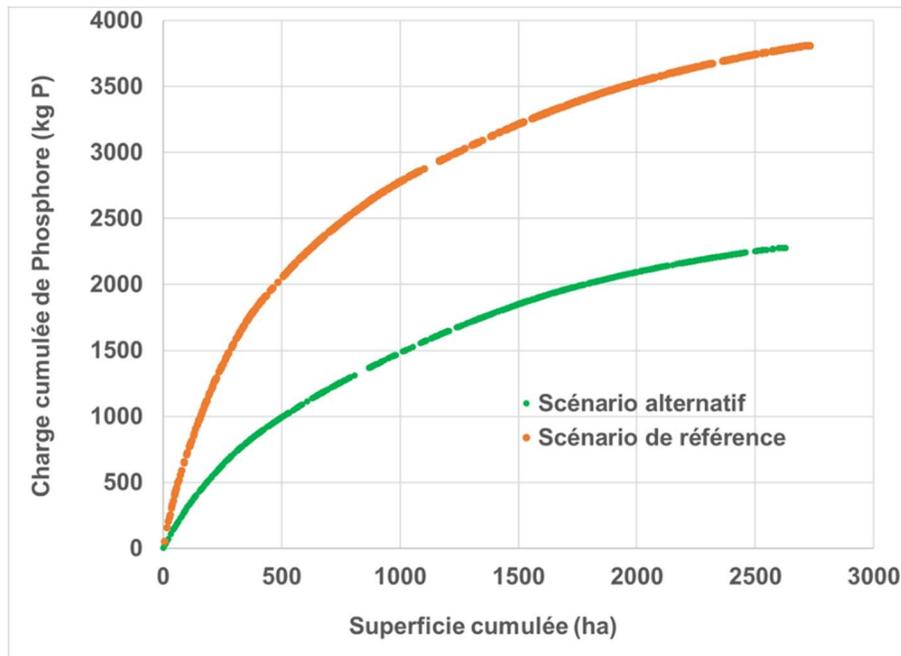


Figure 10. Distribution croissante des charges cumulées de phosphore en fonction de la superficie cumulée pour le scénario de référence et le scénario alternatif de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

2.4.1 Aménagement riverain

Les cours d'eau du bassin versant de la Baie Missisquoi ont profité de nombreux aménagements riverains au fil du temps, coordonnés par la Coopérative de Solidarité de la Rivière Au Brochet (CSBVRB), la MRC Brome Missisquoi, l'OBV Baie Missisquoi et le club conseil en agroenvironnement Dura-Club. Le scénario d'aménagement riverain retenu pour la présente étude s'inspire du projet Lisière Verte orchestré par CSBVRB (Lauzier, 2009). Ce projet, d'une ampleur inédite au Québec, a supporté l'aménagement de près de 80 km de bande riveraine élargie et plus de 600 ouvrages de captage et de sédimentation, dans le cadre d'une action concertée dans le bassin versant de la rivière aux Brochets. Pour les besoins de la présente étude, un aménagement de bande riveraine d'une largeur de trois mètres composé d'une rangée d'arbustes a été retenu. La réponse de la qualité de l'eau à ce type d'aménagement a été évaluée dans un micro-bassin de la région d'étude, soit le Ruisseau Castor (Michaud et al., 2005). Reflétant les résultats colligés dans le cadre de cette étude, les algorithmes du méta-modèle GéODEP attribue une efficacité globale de 25% de réduction dans la charge de phosphore particulaire attribuable à l'aménagement de bandes riveraines élargies et de l'interception du ruissellement de surface par des fossés-avaloirs (Michaud et al., 2009). En accord avec la littérature publiée sur le sujet, il est postulé que ce type d'aménagement aura un effet marginal à moyen terme sur les charges de phosphore dissous.

Tel que rapporté au Tableau 7, l'aménagement de 4,4 km de bandes riveraines et de 145 structures de captage affecte 1,084 ha en cultures annuelles. La réduction projetée dans les exportations de sédiments et de phosphore pour les superficies aménagées est de l'ordre de 22 et 19%, respectivement (Tableau 6a). Au global, la réduction dans la charge projetée de sédiments à la rivière est de l'ordre de 457 T (MES) par an, correspondant à 525 kg de P total.

Les coûts d'implantation de la bande riveraine arbustive ont été estimés à 6,21\$/m, sur la base du calculateur du Groupe Pro-Conseil (Tartera, 2019) pour une bande arbustive décrite par Martineau (2014), soit « L'Arbustive – Scénario 5 ». Suivant les mêmes sources, des frais d'entretien de l'ordre de 0,48\$/m pour l'année 2 et 0,21\$/m pour les années 3 à 4 ont été considérés. En ce qui a trait aux structures de captage (fossés-avaloirs), suivant le ratio Nb structures : superficie drainée de 7,5ha/structure déduite du projet Lisière Verte (Lauzier, 2009), les frais d'aménagement de chaque structure sont estimés à 1,213\$/ouvrage, soit le coût rapporté par Lauzier (2009) et actualisé pour 2019 suivant l'indice des prix des intrants agricoles (Banque du Canada, 2019). Au global, et à titre indicatif, le total des frais d'aménagement riverain totalisent ainsi 211000\$, incluant les frais d'entretien sur cinq ans des bandes riveraines (tableau 7).

Une compensation annuelle a également été estimée sur la base de la superficie en culture annuelle convertie en bande riveraine, de même que sur les marges sur coûts variables perdues associées à ces superficies. Celles-ci varient de 188\$/ha pour une céréale à paille de printemps à respectivement 996\$/ha pour le maïs grain et 792\$/ha pour le soja (Belzile, 2019). A titre indicatif, la marge sur coûts variables perdues (\$/ha) serait de l'ordre de 436\$/ha (CRAAQ, 2018a) pour les prairies, advenant un scénario d'aménagement arbustif sur ces champs. Au final, la compensation annuelle totale à verser aux propriétaires pour les superficies en cultures annuelles serait de l'ordre de 1111\$. En y ajoutant une compensation pour les prairies, la compensation annuelle totale à verser atteint 1426\$ (Tableau 7).

En mettant en relation les coûts et les réductions de charges de sédiments et de phosphore associées à l'aménagement intégré des rive (bande riveraine + structures), les coûts spécifiques de la réduction de la charge de P sont de l'ordre de 397\$/kg P, et de 0,46\$/kg MES pour les sédiments (Tableau 7).

Tableau 7. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de sédiments et de phosphore associés à l'aménagement intégré des rives des superficies en culture de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

Occupation du territoire	Longueurs cumulées de cours d'eau (m) ¹	Longueurs cumulées de rives (m) ¹	Superficies ciblées (ha)	Superficie en bande riveraine élargie - 3 m (ha)	Marge sur coûts variables perdue (\$/ha) ²	Compensation annuelle basée sur la superficie en bande riveraine (\$)	Nb d'ouvrages ³	Coût des ouvrages ⁴	Coût d'implantation de la bande riveraine ⁵	Coût total de l'implantation (année 1) ⁶	Coût d'entretien total sur quatre ans ⁷	Coût total (Implantation et entretien) 5 années	Réduction massique de la charge de P (kg)	Réduction massique de la charge de sédiments (kg)	Coût spécifique de la réduction de la charge de P (\$/kg P)	Coût spécifique de la réduction de la charge de MES (\$/kg MES)
Céréales	388	777	143	0.23	188	44	19	23 128	4 825	27 996	855	28 851				
Maïs	1 694	3 388	630	1.02	996	1 012	84	101 892	21 041	123 946	3 727	127 673				
Soja	116	232	311	0.07	792	55	41	50 299	1 443	51 797	256	52 053				
Prairie	1 203	2 406	1 647	0.72	436	315	220	266 375	14 941	281 631	2 647	284 277				
Total- Cultures annuelles	2 199	4 398	1 084	1.32		1 111	145	175 319	27 309	203 739	4 837	208 577	525	456 634	397 \$	0.46 \$
Total en culture	3 402	6 804	2 731	2.04		1 426	364	441 694	42 250	485 370	7 484	492 854				

1: Excluant les cours d'eau et rives du corridor d'inondabilité.
2: Céréales, maïs et soja: Belzile (2019); Prairie: GCAQ (2018).
3: Superficie drainée de 7,5 ha par structure, adapté de Lauzier (2009).
4: Coût moyen (\$ 2019) par aménagement de 1,213\$/structure. Adapté de Lauzier (2009)
5: Coût de 6,21\$/m, adapté de Belzile (2019) et Tertera (2019) pour une bande arbustive, scénario 5 décrit par Martineau (2014).
6: Coûts cumulés de la compensation et des aménagements (ouvrages et bandes riveraine arbustive).
7: Coût de 0,47\$/m pour année 2 et 0,21\$/m pour années 3 à 4. Adapté de Belzile (2019) et Tertera (2019) pour une bande arbustive, scénario 5 décrit par Martineau (2014).

2.4.2 Corridor d'inondabilité

La protection intégrale du corridor d'inondabilité et de mobilité de la portion québécoise de la rivière de la Roche a été considérée dans le cadre de la présente étude. Cette composante du scénario alternatif de gestion se justifie à deux niveaux. D'une part, la protection du corridor d'inondabilité est une des composantes de la Politique gouvernementale de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (MELCC, 2014). D'autre part, une analyse avantage-coûts réalisée par Biron et al. (2013, 2014) a démontré que l'aménagement de l'espace de liberté de la portion Québécoise de la rivière de la Roche était socialement avantageux. Une valeur nette de près de 750000\$ a été projetée, s'étalant sur une période de cinquante ans, en considérant l'ensemble des coûts et des avantages liés à l'aménagement du corridor de liberté.

L'effet du corridor de liberté sur les flux de sédiments et de phosphore a été projeté sur la base des estimations de flux par le méta-modèle GÉODEP pour les superficies incluses dans le corridor d'inondabilité et de mobilité définie par Biron et al. (2015), tel qu'illustré en figure 11. Au global, 58 ha en culture sont inclus dans le corridor délimité de part et d'autre de la rivière (Tableau 8), dont 34 ha en prairie et 18 ha en maïs. Ces superficies en culture correspondent à une charge annuelle projetée de 65 tonnes de sédiments et 96 kg de phosphore (Tableau 6a). Rappelons ici qu'il s'agit de projections de flux émis des champs en culture, qui excluent les contributions en sédiments et en phosphore liées aux processus d'érosion riveraine. Des études réalisées au Québec, à proximité de la zone d'étude (Bassin Ewing, rivière Aux Brochets; Michaud et al, 2019) de même que pour les portions états-uniennes de la rivière de la Roche et Missisquoi (Winchell et al, 2011) ont situé ces contributions dans l'ordre de 30 à 40% de la charge globale de sédiments et de phosphore aux rivières. Ces indications suggèrent que les charges de référence projetées par GÉODEP pour la superficie en culture localisées dans le corridor d'inondabilité, dans l'ordre de 1,11 kg P/ha et de 1,1 T MES/ha, demeurent des estimations conservatrices.

Sur la seule base des projections de GÉODEP pour les superficies en culture converties en corridor riverain naturel, les réductions de charges de sédiments et de phosphore sont estimées respectivement à 63 T de matières en suspension et 88 kg de phosphore, respectivement. Considérant les mêmes marges sur coûts variables perdue que celles retenues pour les bandes riveraines élargies pour chacune des quatre classes de culture, la compensation annuelle atteindrait 35270\$ (Tableau 7).

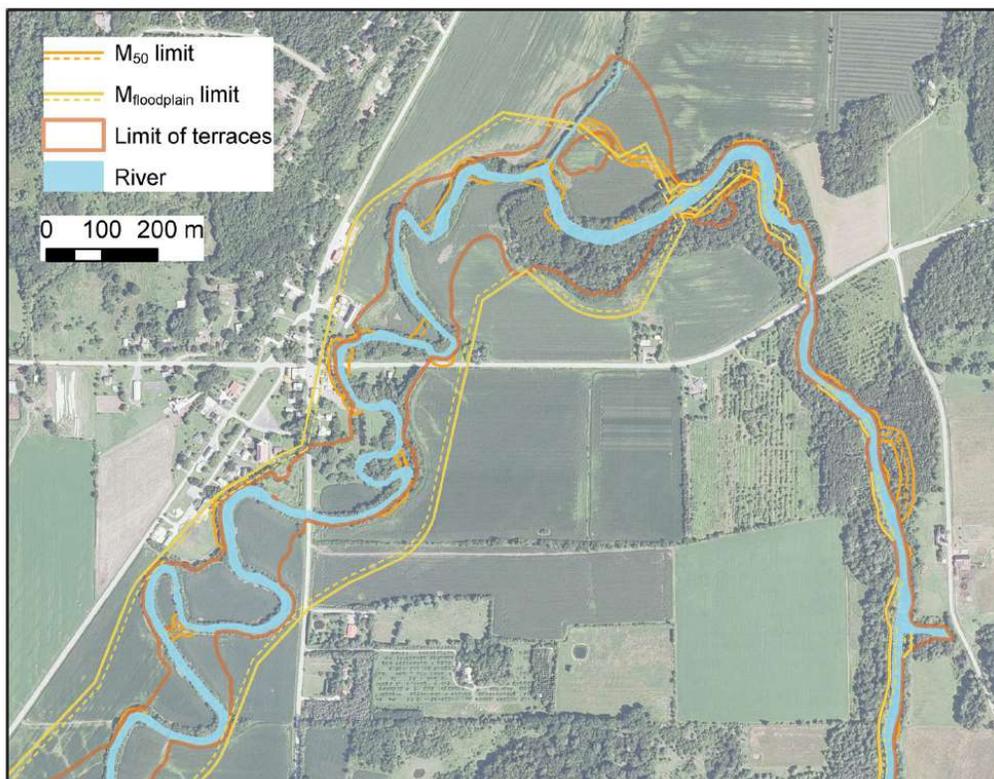


Figure 11. Corridor d'inondabilité et de mobilité de la portion Québécoise de la rivière de la Roche (Biron et al., 2014).

Tableau 8. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de sédiments et de phosphore associés aux conversions des cultures dans le corridor d'inondabilité, et les zones critiques de vulnérabilité à l'érosion de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

Scénario de gestion agricole	Céréales	Prairie	Maïs	Soja	Total	Réduction massique de la charge de P (kg)	Réduction massique de la charge de sédiments (kg)	Coût spécifique de la réduction de la charge de P (\$/kg P)	Coût spécifique de la réduction de la charge de MES (\$/kg MES)
Conversions des cultures dans le corridor d'inondabilité									
Superficie traitée (ha)	3	34	18	2	58				
Marge sur coûts variables perdue (\$/ha) ¹	188 \$	436 \$	996 \$	792 \$					
Compensation annuelle (\$)	645	15 023	17 997	1 605	35 270 \$	88	63 099	399.22 \$	0.56 \$
Conversions des prairies en zones critiques (inclinaison de pente > 10%)									
Superficie traitée (ha)	0	52	0	0	52				
Marge sur coûts variables perdue (\$/ha) ¹	188 \$	436 \$	996 \$	792 \$					
Compensation annuelle (\$)	0	22 506	0	0	22 506 \$	42	19 615	530.11 \$	1.15 \$
Conversions des cultures annuelles vulnérables (Charge annuelle de P > 9 kg P/ha)									
Superficie traitée (ha)	0	0	39	10	50				
Marge sur coûts variables perdue (\$/ha) ¹	188 \$	436 \$	996 \$	792 \$					
Compensation annuelle (\$)	0	0	39 213	8 031	47 243 \$	371	409 295	127.28 \$	0.12 \$
1: Céréales, maïs et soja: Belzile (2019); Prairie: GCAQ (2018).									

2.4.3 Conversions des prairies en zones critiques

Compte tenu du relief fort accidenté de certains secteurs du bassin versant, certaines zones en culture sont estimées fortement vulnérables au processus d'érosion. Un total de 52 ha en culture sur des pentes de parcours de l'eau excèdent 10% ont ainsi été localisées dans le bassin versant. Bien que présumées en prairie, ces superficies sont associées à un taux projeté annuel moyen de près d'un kilogramme de phosphore par hectare, pour près d'une demi-tonne de sédiments exportés (Tableau 6b). Suivant une projection de marge sur coûts variables perdue de l'ordre de 436\$/ha (Tableau 8), le retrait de la production de ces 52 ha en zone de vulnérabilité critique à l'érosion superficies impliquerait une perte financière annuelle de l'ordre de 22500\$.

2.4.4 Conversions des cultures annuelles vulnérables

Un retrait de production des cultures annuelles les plus à risque au plan des émissions de sédiments et de phosphore a également été considéré dans le scénario alternatif de gestion. Ces superficies en cultures de maïs et de soja sont associées à une charge spécifique moyenne de plus de 8 kg/ha de phosphore et de 8,5 T de sédiments par année (Tableau 6a). Conceptuellement, ce retrait de production est considéré à titre de « dernier recours », dans la mesure où le cumul de l'ensemble des autres mesures de conservation ne permettent pas, en théorie, d'atteindre la cible de réduction de 40% de la charge de phosphore projetée dans le scénario de référence.

Tel que rapporté aux Tableaux 6a et 8, la réduction des charges de P et de MES projetée pour la conversion des superficies les plus vulnérables en cultures annuelles est considérable. Le changement de vocation de ces 50 ha en production de cultures annuelles est associé à une réduction projetée de 371 kg de P et 409 T de sédiments par année. Considérant les marges sur coûts variables perdue de l'ordre de 996\$/ha et de 792\$/ha, respectivement pour le maïs et le soja, la perte financière annuelle atteindrait plus de 47000\$ par année (Tableau 8).

2.4.5 Culture sur résidus

En scénario de référence, les superficies présumées labourées en culture de maïs grain sur sol à texture lourde et mal drainé dans la région à l'étude (533 ha) sont associées à une projection de perte de phosphore moyenne de 3,72 kg P/ha, et une charge de sédiments dépassant 2,5 T/ha (Tableau 6b). Le déchaumage printanier, en alternative au labour d'automne pour les sols les moins bien drainés (groupe hydrologique « D »), combiné au passage au semi direct pour les sols du groupe hydrologique « C » se traduit en des réductions projetées de 559 kg de P, et de 650 T de sédiments par année. Au global, les réductions projetées sont de l'ordre de 28 et 41%, respectivement pour les charges de phosphore et de sédiments pour les superficies de maïs ciblées, correspondant à 20% de la superficie totale en culture du bassin versant (Tableau 6b). Les réductions cumulées de charges de phosphore et de sédiments pour les superficies en maïs converties à la culture sur résidus sont ainsi projetées à 559 kg P et 650 T de sédiments par année (Tableau 9).

Tableau 9. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de sédiments et de phosphore associés au travail réduit du sol des superficies en maïs grain pour la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

Scénario de gestion agricole	Déchaumage au printemps (ha) ¹	Semis directs (ha) ²	Coût total (\$) ³	Réduction massique de la charge de P (kg)	Réduction massique de la charge de sédiments (kg)	Coût spécifique de la réduction de la charge de P (\$/kg P)	Coût spécifique de la réduction de la charge de MES (\$/kg)
Culture sur résidus (maïs)							
Superficie traitée (ha)	398	231	(33,467)				
Marge sur coûts variables perdue (\$/ha) ¹	(40)	(76)					
Compensation annuelle (\$)	0	0		559	650 270	(60)	(0.51)
1: Groupes hydrologiques de sol D (398 ha). Réduction des dépenses de 40\$/ha.							
2: Groupes hydrologiques de sol C (231 ha). Réduction de dépenses de 76\$/ha.							
3: Les montants entre parenthèses indiquent un gain de la marge sur coûts variables.							
4: Les montants entre parenthèses indiquent un bénéfice plutôt qu'un coût.							

Cette pratique de gestion alternative présente le meilleur ratio coût : efficacité sur le plan de la réduction des flux de P et de MES de toutes les pratiques considérées dans le scénario alternatif de gestion agricole. À défaut de données technico-économiques consistantes pour le Québec, les différences de coûts des opérations et des intrants par unité de superficie rapportées par Hodde et al. (2016) de l'Université de Purdue (Indiana), ont été utilisées à titre de référence économique pour les fins de la présente étude. Cette dernière est basée sur la documentation exhaustive des coûts de transition d'une pratique culturale du labour vers le travail réduit du sol et du semi direct. Hodde et al. (2016) estiment que le passage à la culture sur résidus se traduit en baisse du coût des opérations et des intrants, plutôt qu'en une augmentation, tel que résumé au Tableau 9, suivant une conversion et actualisation des données en devises canadiennes (Banque du Canada, 2019). Le travail réduit du sol présente ainsi en baisse de coûts de 40\$/ha (canadien), résultant du remplacement du labour (76\$/ha) par le déchaumage (36\$/ha). Il est ici postulé, pour optimiser la retombée environnementale de la culture sur résidus, que le travail primaire du sol sur sol lourd (398 ha) est reporté au printemps en ayant recours à un train d'outils adaptés qui permet de conditionner les résidus de culture et de travailler superficiellement le sol. Cette opération sera suivie d'un travail secondaire, typiquement avec un cultivateur avec grand dégagement, puis du passage du semoir équipé de tasses-résidus. Il est aussi postulé que la culture du soja suivra celle du maïs, de façon à assurer la faisabilité du déchaumage printanier des chaumes de maïs sur sol lourd. Le semi plus tardif du soja, comparativement au maïs, laisse en effet le temps au sol de se ressuyer et de procéder au déchaumage en conditions optimales.

En ce qui a trait à la conversion au semi direct pour les sols en retour de maïs sur les sols du groupe hydrologique « C » (231 ha), la baisse de coûts projetée par Hodde et al. (2016) est encore plus importante que pour le travail réduit. La réduction du coût des opérations culturales est projetée à plus de 103\$/ha (canadien), alors que l'augmentation du coût des intrants est projetée à près de 27\$/ha, pour une réduction nette de 76\$/ha (Tableau 9). Au final, il est donc projeté que le passage à la culture sur résidus conjugue bénéfices environnementaux et économiques, alors que chaque kilogramme de P conservé au champ est associé à un bénéfice de 60\$ (Tableau 9).

Tableau 10. Différences dans les coûts de production associées à la conversion de la pratique culturale de labour vers le travail réduit du sol et le semi direct en production de maïs grain.

	Labour vers Chisel	vers semis direct
Opérations culturales		
DMI-7 coutres 4 po. (Chisel)	36.43 \$	
Labour	-76.45 \$	-76.45 \$
Reprise, Cultivateur		-38.42 \$
Arrosage		12.10 \$
Tot opérations culturales	-40.02 \$	-102.78 \$
Intrants (Glyphosate+2,4-D ester + Sulf. Ammon.)		26.81 \$
Total (Opérations et intrants)	-40.02 \$	-75.96 \$
Adapté de Hodde et al, 2016		

2.4.6 Cultures de couverture

Si la culture sur résidus s'avère efficace en production de maïs grain dans la prévention de l'érosion et du phosphore particulaire, la culture de soja demeure vulnérable en absence de travail du sol en raison du faible couvert de résidus. Aussi, l'ensemble des superficies en culture de soja de la zone d'étude (311 ha, 11% de la superficie en culture), s'est vu attribué une culture de couverture. Il est postulé que la faisabilité de la culture de couverture intercalaire ou en dérobée dans le soja est bien établie dans la région d'étude, au climat particulièrement clément par rapport aux régions plus au nord de la province. Le Tableau 11 présente différents scénarios potentiels de régie de culture de couverture adaptés à la culture du soja, suivant une implantation intercalaire (lotier) ou à la dérobée (avoine ou seigle). Le recours à l'avoine et au seigle pour couvrir le sol en fin de saison est une pratique reconnue efficace dans la région d'étude. La faisabilité et les avantages du semis en début de saison du lotier au stade 2 trifoliées du soya ont été démontrés plus récemment, notamment dans le cadre d'un réseau d'essais à la ferme en Montérégie Ouest (Thibaudeau, 2017).

Au global, la réduction projetée de la charge de sédiments par le méta-modèle est de 55%, alors que la charge de P est atténuée de 38% par rapport au scénario de référence (Tableau 6b) pour l'ensemble des superficies en soja. Cette réduction est associée à la protection hivernale contre l'érosion assurée par la culture de couverture. Il est ici postulé qu'aucun apport d'engrais de ferme ne serait appliqué sur la culture de couverture suivant la récolte du soja, de façon à assurer aussi des retombées tangibles sur le plan de l'atténuation des pertes de P. Des études réalisées au Québec en parcelles expérimentales (Michaud et Laverdière, 2005) et en dispositif de micro-bassins versants (Michaud et al., 2016) ont démontré la pertinence d'incorporer les engrais de ferme afin de profiter des retombées anti-érosives de la culture de couverture, tout en prévenant l'enrichissement du ruissellement de surface en phosphore.

Tableau 11. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de sédiments et de phosphore associés aux cultures de couverture implantées dans les superficies en soja pour la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

Scénario de gestion agricole	Superficie (ha)	Scénario Lotier intercalaire (\$/ha) ¹	Scénario Avoine post-récolte (\$/ha) ²	Scénario Seigle post-récolte (\$/ha) ³	Moyenne (\$/ha)	Coût total ⁴	Réduction massive de la charge de P (kg)	Réduction massive de la charge de sédiments (kg)	Coût spécifique de la réduction de la charge de P (\$/kg P)	Coût spécifique de la réduction de la charge de MES (\$/kg MES)
Cultures de couverture (soja)	311	226 \$	111 \$	110 \$	149 \$	34 494	222	216 453	155.38 \$	0.16 \$
1: Lotier à la volée, stade 2-3 feuilles trifoliées du soja. 205\$/ha (semences et inoculant) et 21\$/ha pour les opérations culturales (CRAAQ, 2016).										
2: Avoine, post-récolte . 82\$/ha (semences et inoculant) et 29\$/ha pour les opérations culturales (CRAAQ, 2016).										
3: Seigle, post-récolte . 71\$/ha (semences et inoculant, brûlage (5\$/ha) et 34\$/ha pour les opérations culturales (CRAAQ, 2016).										
4: Basé sur le scénario d'avoine en post-récolte										

En ce qui a trait aux perspectives financières, les coûts d'implantation passent du simple au double du scénario à la dérobée (avoine ou seigle, 110\$/ha) vers l'intercalaire (lotier, 226\$/ha) suivant les estimations du CRAAQ (2016). La culture du lotier trouverait sa justification économique dans le crédit d'azote symbiotique apporté au sol, de même que dans l'amélioration de la condition physique du sol en lien avec l'abondante biomasse apportée et le conditionnement de la structure du sol par les racines de la légumineuse. Sur la base du scénario d'implantation de céréale à la dérobée, retenu pour les fins de l'analyse économique, le coût total de la mesure de protection des sols est de l'ordre de 34500\$ pour l'ensemble des superficies en retour de soja de la zone d'étude. Suivant ce scénario, le coût spécifique de la réduction de la charge de phosphore est de 155\$ pour chaque kilogramme de P conservé au champ.

Une alternative au scénario de culture de couverture en intercalaire ou à la dérobée est l'introduction de la culture de blé panifiable d'automne dans la rotation. La marge sur coûts variables de cette culture est avantageuse, de l'ordre de 793\$/ha (CRAAQ, 2018b), se situant entre celles du maïs grain et du soja. L'introduction du blé d'automne permet ainsi d'assurer une protection efficace du sol à coût pratiquement nul pour l'entreprise agricole. L'établissement de la culture suivant un semi à la volée précédent la chute des feuilles du soja est privilégiée afin d'assurer une protection anti-érosive optimale. La survie à l'hiver demeure cependant un facteur de risque dans la région d'étude, ce qui limite l'intérêt pour cette culture.

2.4.7 Incorporation des engrais de ferme

Suivant le scénario de référence de gestion, il est estimé qu'environ 840 ha de cultures en prairie bénéficient d'épandage de lisier. Compte tenu du risque documenté de l'enrichissement du ruissellement de surface par des engrais de ferme non incorporé, la pratique d'incorporation des lisiers dans les prairies a été incluse dans le scénario alternatif de gestion. L'enrichissement du ruissellement en P dissous par les algorithmes de GÉODEP est estimé sur la base de la concentration initiale en P dissous estimée pour la parcelle, sans amendement organique. Le taux projeté d'accroissement de la concentration en P dissous du ruissellement découle de mesures en réseau d'étude en parcelles sous simulateur de pluie réalisée dans le bassin versant voisin de la rivière aux Brochets (Michaud et Laverdière, 2004). Une relation linéaire significative avait alors été établie, définissant l'enrichissement du ruissellement d'une parcelle amendée sur la base de la richesse du ruissellement du sol non amendé. Pour la zone d'étude, la charge annuelle projetée

en P par GÉODEP pour les superficies en prairie bénéficiant d'épandage de lisier non incorporé est de 505 kg, soit 0,58 kg P/ha. La charge résultante de l'incorporation est projetée à 386 kg de phosphore, pour une efficacité moyenne de 24% par rapport à la charge du scénario de référence, sans incorporation.

Concrètement, plusieurs avenues permettent d'éviter les pertes évènementielles de P suivant l'épandage d'engrais de ferme, notamment l'incorporation par le travail du sol lors de du renouvellement des prairies ou l'épandage en post-levée avec différents dispositifs d'incorporation. Pour les fins de l'analyse des coûts, deux sources d'information documentant l'augmentation des coûts d'épandage liés aux dispositifs d'incorporation ont été mises à profit. D'une part, le coût d'incorporation des lisiers sur prairie au moyen d'un injecteur à disques (travail à forfait) est estimé à 116\$/ha par le service de conservation des ressources naturelles (NCRS) dans l'état du Vermont (Harlow, 2018). Sur cette base, le service d'extension supporte 75% du coût de l'injection, soit 87\$/ha. Au Québec une analyse des coûts additionnels associée à un changement du mode d'épandage par rampe basse pression à la rampe d'incorporation a été réalisée par Baril-Tremblay et al. (2008). Reprenant les résultats de simulation d'un volume épandu de 3,500 T de lisier avec une teneur en azote de 3,5 kg N/T, et retenant une superficie d'épandage de 70 ha à un taux de 50 t/m³, le coût supplémentaire actualisé pour 2018 du recours à l'incorporation, par rapport à la rampe à basse pression, est de 87\$/ha (2,00\$/m³) pour un producteur qui procède à ses propres épandages. Pour un épandage à forfait, le coût supplémentaire projeté des résultats de Baril-Tremblay et al. (2008) est de 122\$/ha, soit une estimation très proche de celle de l'état du Vermont (116\$/ha). Pour les fins de la présente analyse, le coût d'incorporation de 87\$/ha associée à une gestion par le producteur est retenu. La réduction projetée de 119 kg de P de la charge de P associé à l'incorporation de l'engrais de ferme dans les prairies se traduit dès lors en un coût spécifique de 615\$/kg P (Tableau 12). Retenons que ce coût spécifique très élevé traduit une efficacité moyenne de 24% de réduction de la charge de P, rapportée sur l'ensemble des superficies en prairie amendée aux engrais de ferme. En fait, l'efficacité projetée de la pratique augmente avec le taux de richesse en P de la parcelle. Des ratios coût : efficacité plus avantageux découleraient ainsi d'une application ciblée de l'incorporation des lisiers sur les sols riches en phosphore.

Tableau 12. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de phosphore associés à l'incorporation des lisiers dans les prairies pour la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

Scénario de gestion agricole		Réduction massique de la charge de P (kg)	Réduction massique de la charge de sédiments (kg)	Coût spécifique de la réduction de la charge de P (\$/kg P)	Coût spécifique de la réduction de la charge de MES (\$/kg)
Incorporation des engrais de ferme					
Superficie traitée (ha)	841				
Marge sur coûts variables perdue (\$/ha) ¹	87 \$				
Compensation annuelle (\$)	73 167 \$	119	NS	615 \$	NS

1: Adapté de Baril-Tremblay et al. (2008) et Harlow (2018).

2.4.8 Scénario alternatif de gestion global

La synthèse des efficacités et des coûts de l'ensemble des pratiques alternatives de gestion incluses dans le scénario alternatif est présentée au Tableau 13. En théorie, la cible de 40% de réduction de la charge de phosphore par rapport au scénario de référence est atteinte. L'ensemble des superficies où les pratiques étaient applicables sont alors mises à contribution, ce qui implique un taux d'adhésion de 100% des entreprises agricoles aux pratiques alternatives projetées. Une importante disparité dans les ratios coût : efficacité des pratiques alternatives de gestion est par ailleurs mise en relief. Les coûts spécifiques projetés de la réduction des charges de sédiments et de phosphore passent en effet d'un coût nul pour la conversion à la culture sur résidus, à plus de 600\$ par kilogramme de phosphore pour l'incorporation des engrais de ferme. Le ratio coût : efficacité projeté des pratiques de gestion alternative au plan de la réduction de la charge de phosphore, suivant l'ordre décroissant, va comme suit : Culture sur résidus > Conversion des cultures annuelles > Cultures de couverture > Aménagement riverain > Corridor de liberté du cours d'eau > Conversion des prairies > Incorporation des engrais de ferme (Tableau 13).

Rappelons que ces ratios expriment le coût d'implantation de la pratique par rapport à son efficacité moyenne à réduire les charges de P pour l'ensemble des champs où elle a été appliquée. Tel que commenté antérieurement en section 2.3, le relief et les systèmes cultureux du bassin versant de la rivière de la Roche induisent une forte variabilité spatiale dans les charges projetées de sédiments et de phosphore. Les quantités de sédiments ou de phosphore retenues au champ, découlant d'une pratique alternative donnée, vont ainsi varier d'un champ à l'autre, reflétant la vulnérabilité initiale de la parcelle. Il s'ensuit une forte variabilité dans l'efficacité (coût spécifique de réduction) d'une pratique donnée. Une implication pratique de cette variabilité de l'efficacité des pratiques alternatives de gestion est tout l'intérêt de cibler les champs les plus vulnérables dans l'introduction des pratiques culturelles de conservation et d'aménagement des terres.

Tableau 13. Analyse des coûts et des bénéfices en termes de réduction des charges de phosphore et de sédiments du scénario alternatif de gestion global.

Scénario de gestion agricole	Réduction massique de la charge (kg)	Taux relatif de réduction de la charge sur la superficie traitée (%)	Taux relatif de réduction de la charge agricole du bassin (%)	Coût spécifique de la réduction de la charge (\$/kg)	Coût total de la réduction de la charge (\$)
Aménagement riverain (1,083 ha)					
Bandes riveraines et ouvrages					
Phosphore	-525	-19%	-14%	397.48 \$	208 577
Sédiments	-456 634	-22%	-19%	0.46 \$	
Conversions des cultures dans le corridor d'inondabilité (58 ha)					
Phosphore	-88	-92%	-3%	399.22 \$	35 270
Sédiments	-63 099	-98%	-3%	0.56 \$	
Conversions des prairies en zones critiques (52 ha)					
Phosphore	-42	-85%	-4%	530.11 \$	22 506
Sédiments	-19 615	-79%	-1%	1.15 \$	
Conversions des cultures annuelles vulnérables (50 ha)					
Phosphore	-371	-90%	-10%	127.28 \$	47 243
Sédiments	-409 295	-97%	-17%	0.12 \$	
Culture sur résidus (533 ha)					
Phosphore	-559	-28%	-15%	Nul	Nul
Sédiments	-650 270	-41%	-28%	Nul	
Cultures de couverture (311 ha)					
Charge résultante en P (kg)	-222	-38%	-6%	155.38 \$	34 494
Charge résultante en MES (kg)	-216 453	-55%	-9%	0.16 \$	
Incorporation des engrais de ferme (841 ha)					
Charge résultante en P (kg)	-119	-24%	-3%	614.85 \$	73 140
Charge résultante en MES (kg)	0	0%	0%	Nul	
Cumul de toutes les pratiques (2010 ha)					
Charge résultante en P (kg)	1 527		-40%	275.79 \$	421 229
Charge résultante en MES (kg)	1 364 218		-58%	0.31 \$	

2.5 Paramétrage du modèle, portion Vermontoise du bassin versant

La projection des flux de sédiments et de phosphore pour la portion états-unienne du bassin versant de la rivière de la Roche a été réalisée avec le support du méta-modèle GÉODEP suivant une procédure similaire à celle appliquée à la portion Québécoise du bassin versant. La validation des projections s'est également appuyée sur les données hydrométriques colligées par Simoneau (2019), mettant à profit les observations de la station du MELCC localisée à l'entrée de la rivière De la Roche au Québec. L'objectif principal de ce volet d'étude au Vermont était d'évaluer la performance du méta-modèle GÉODEP dans des systèmes de cultures et un environnement géophysique différents du Québec. Puisque cette portion du bassin versant de la rivière de la Roche avait également profité d'une modélisation hydrologique avec le modèle SWAT par l'équipe de Stone Environmental, la démarche a également permis de comparer les performances du méta-modèle GÉODEP, de nature empirique, à celle du modèle physique SWAT. La démarche s'est trouvée facilitée du fait que l'équipe de l'IRDA était familière avec l'étude Vermontoise, pour avoir collaboré à sa réalisation. L'équipe de l'IRDA a notamment fourni certaines modifications du code informatique original, de même que des données à référence spatiales sur les sols et les systèmes culturels du Québec.

La procédure de paramétrage de GÉODEP pour la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche est semblable à celle appliquée à la portion québécoise du bassin versant et décrite antérieurement. Conceptuellement, le méta-modèle GÉODEP requiert un ensemble de données de paramétrage semblable au modèle hydrologique SWAT. Les données pertinentes aux propriétés des sols, aux facteurs topographiques (LS), à l'occupation du territoire et à sa gestion colligées par l'équipe de Winchell (2011) ont ainsi été utilisées dans la procédure de paramétrage de GÉODEP pour le Vermont, suivant un découpage spatial identique des unités de calcul (unités de réponses hydrologiques) des auteurs Vermontois. Cet appariement des unités de calcul a facilité la comparaison des performances des deux modèles à discriminer la vulnérabilité du territoire aux processus d'érosion et de pertes de phosphore.

La figure 12 illustre le portait des sols, de l'hydrographie, du relief et de l'occupation des sols découlant du paramétrage du méta-modèle GÉODEP pour les 9977 unités de réponse hydrologique (URH) de la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche. Pour le paramétrage de la richesse des sols Vermontois en phosphore, les données colligées par Winchell et al. (2011) ont été converties en unités de P extractible au Mehlich-III et en pourcentage de saturation (P/Al Mehlich-III) suivant les équations proposées par le laboratoire de l'Université du Vermont (UVM Agricultural Testing Laboratory, courtoisie de J. Tilley et D. Ross). En ce qui a trait au paramétrage des apports de phosphore sur le parcellaire agricole, un taux uniforme de 20 kg P₂O₅/ha d'apport en engrais minéraux appliqué en bande au semis à été retenu pour les cultures annuelles de maïs et de soja. L'application de P provenant des engrais de ferme sur les cultures de maïs en pré-semis a été fixée uniformément à 29 kg P₂O₅/ha. Au global, le bilan d'apport moyen résultat de ces taux d'application pour l'ensemble de la superficie en culture au Vermont est de 32 kg P₂O₅/ha, légèrement en hausse par rapport à celui du Québec rapporté antérieurement (28 kg P₂O₅/ha). Pour plus de détails sur les propriétés biophysiques et l'occupation du territoire de la portion québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche, le lecteur est invité à consulter le rapport scientifique de Winchell et al. (2011) disponible en ligne.

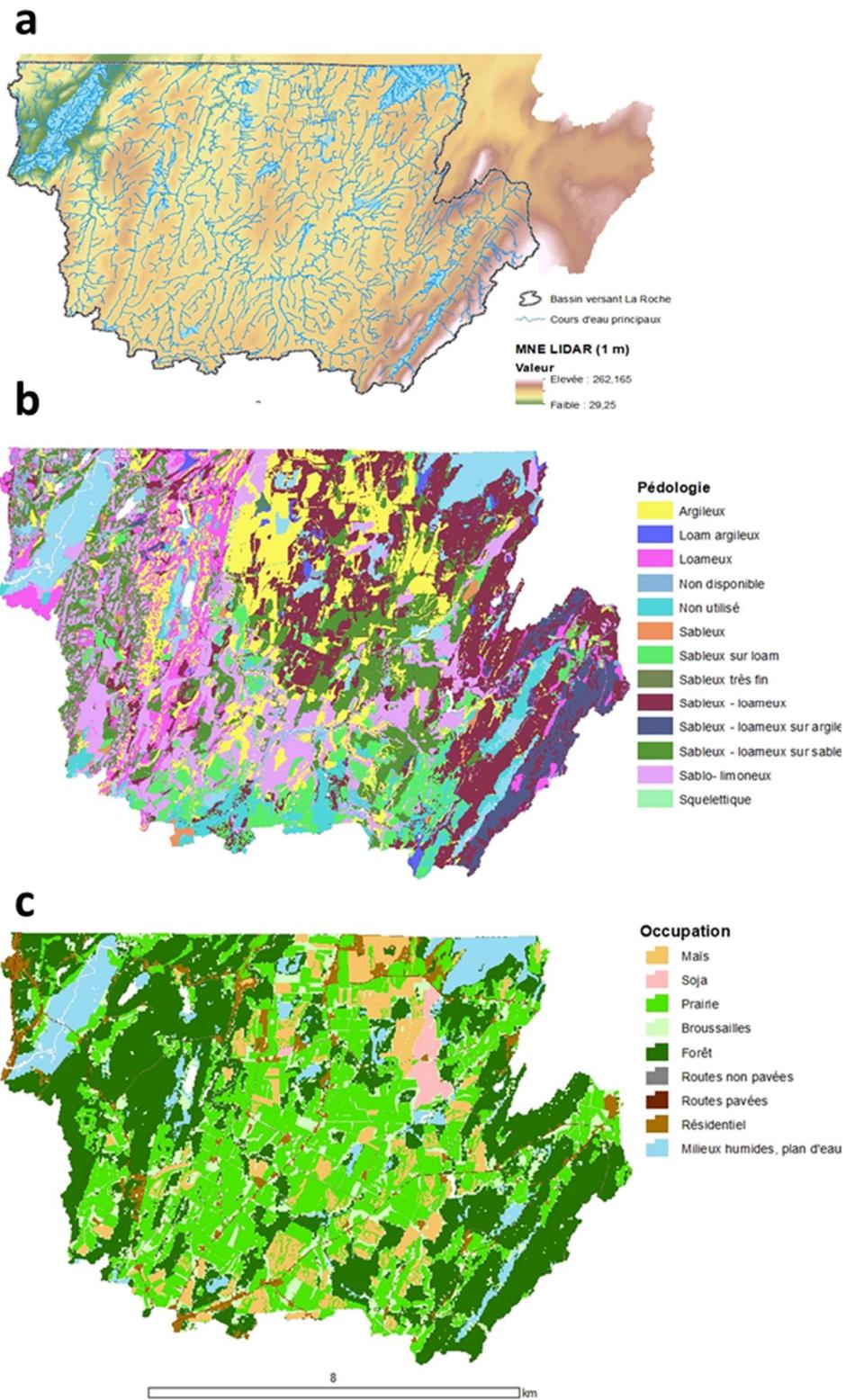


Figure 12. Relief et hydrographie (a), textures de surface des sols (b) et occupation du sol (c) de la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

2.6 Résultats de la modélisation GéODEP pour le scénario de référence de la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche

Les Figures 13 à 15 illustrent les hauteurs de ruissellement, de charges de sédiments et de charges de phosphore projetées par GéODEP pour l'ensemble des unités de réponse hydrologique (URH) de la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche. Les distributions des mêmes indicateurs pour les URH en occupation agricole sont illustrées en figure 16 et 17, et leurs totaux compilés au Tableau 14.

Globalement, à l'échelle de la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche, les projections de charges de sédiments et de phosphore pour les 9977 unités de réponse hydrologique (URH) totalisent respectivement 7258 T MES/an et 0,79 kg P/an. Dans l'ensemble, les flux de phosphore projetés par GéODEP sont dans l'ordre de grandeur des flux rapportés par Simoneau (2018), compris entre 0,86 (2001-2010) et 0,94 kg P/ha (2011-2017). La sommation des flux projetés par GéODEP (1123 kg MES/ha) spécifiques de sédiments par GéODEP dépasse cependant largement les flux estimés à la sortie du territoire Vermontois par Simoneau (2018), qui situait plutôt la charge annuelle à la hauteur de 355 kg MES /ha en 2001-2010, à 479 kg MES /ha pour la période 2011-2017.

Deux hypothèses sont avancées pour expliquer l'écart dans les projections et les observations de charges de sédiments de la portion Vermontoise du bassin versant. D'une part, sur le plan méthodologique, la méthode de calcul des facteurs topographiques de vulnérabilité à l'érosion (LS) utilisée par Winchell et al. (2011) diffère des algorithmes de GéODEP. Au final, la comparaison des distributions des facteurs LS estimés pour la portion Québécoise (Figure 6) et Vermontoise (Figure 16) met en relief des indices LS relativement plus élevés pour le parcellaire agricole Vermontois. Ces derniers se traduisent par des charges spécifiques projetées de sédiments à la hausse par rapport au Québec. Pour le maïs par exemple, la projection moyenne annuelle est de 3,0 T MES/ha pour le Vermont, contre 1,6 T MES/ha pour le Québec (Tableaux 5 et 15). Il est par ailleurs estimé que le paysage, de même que l'occupation et l'aménagement des terres au Vermont soient plus propices aux processus de sédimentation des charges de sédiments dans le réseau hydrique. Une densité plus élevée du drainage de surface au Québec, notamment, expliquerait une capacité de transport de sédiments relativement plus efficace par le réseau de fossés et de cours d'eau. Ces facteurs hydrodynamiques ne sont cependant pas pris en compte par GéODEP, qui se limite à projeter les charges émises depuis le parcellaire, sans considération pour leur devenir dans le réseau hydrographique.

Ruissellement de surface du bassin La Roche (Vermont)

Scénario de référence

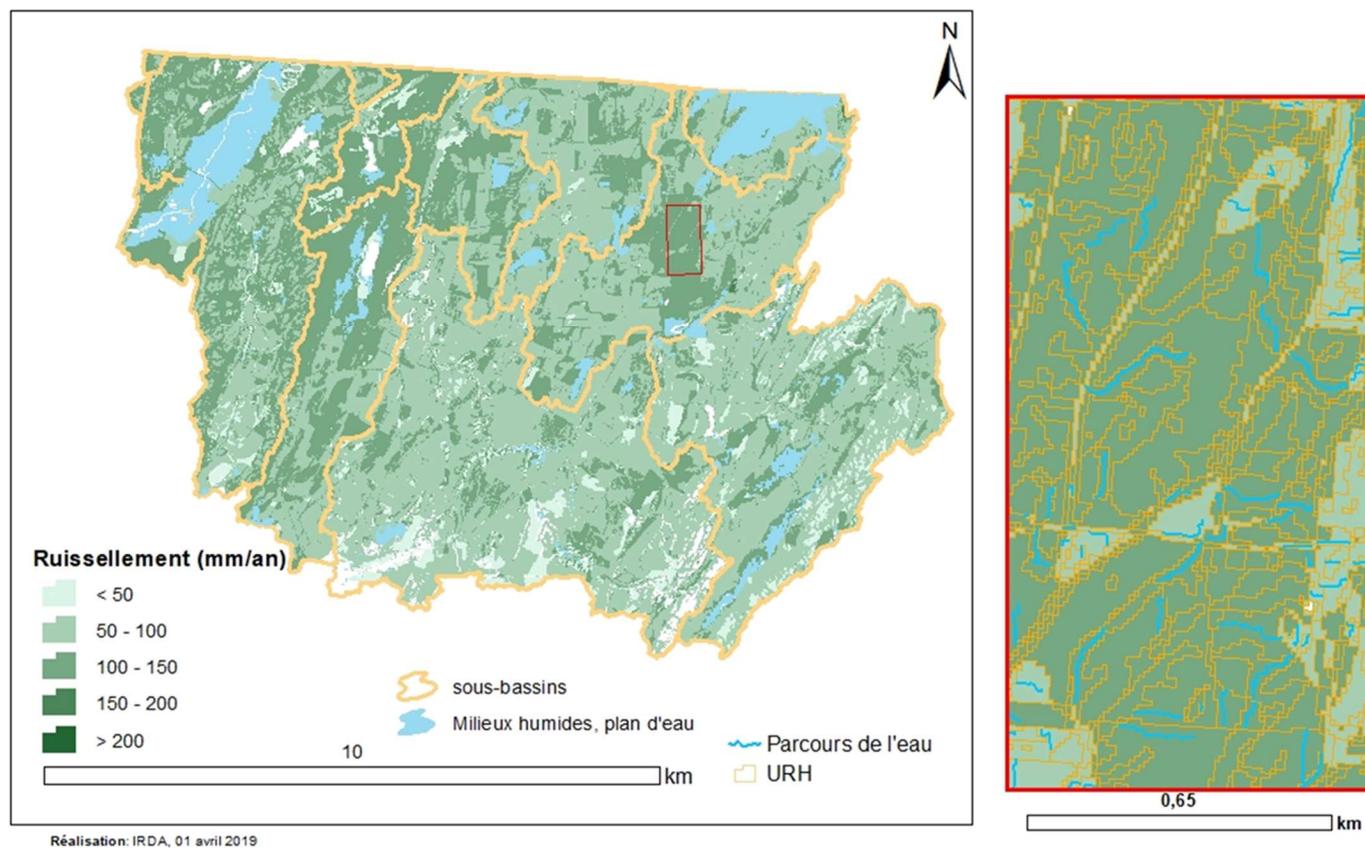


Figure 13. Hauteur de ruissellement de surface projetée pour la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

Exportation de sédiments du bassin La Roche (Vermont)

Scénario de référence

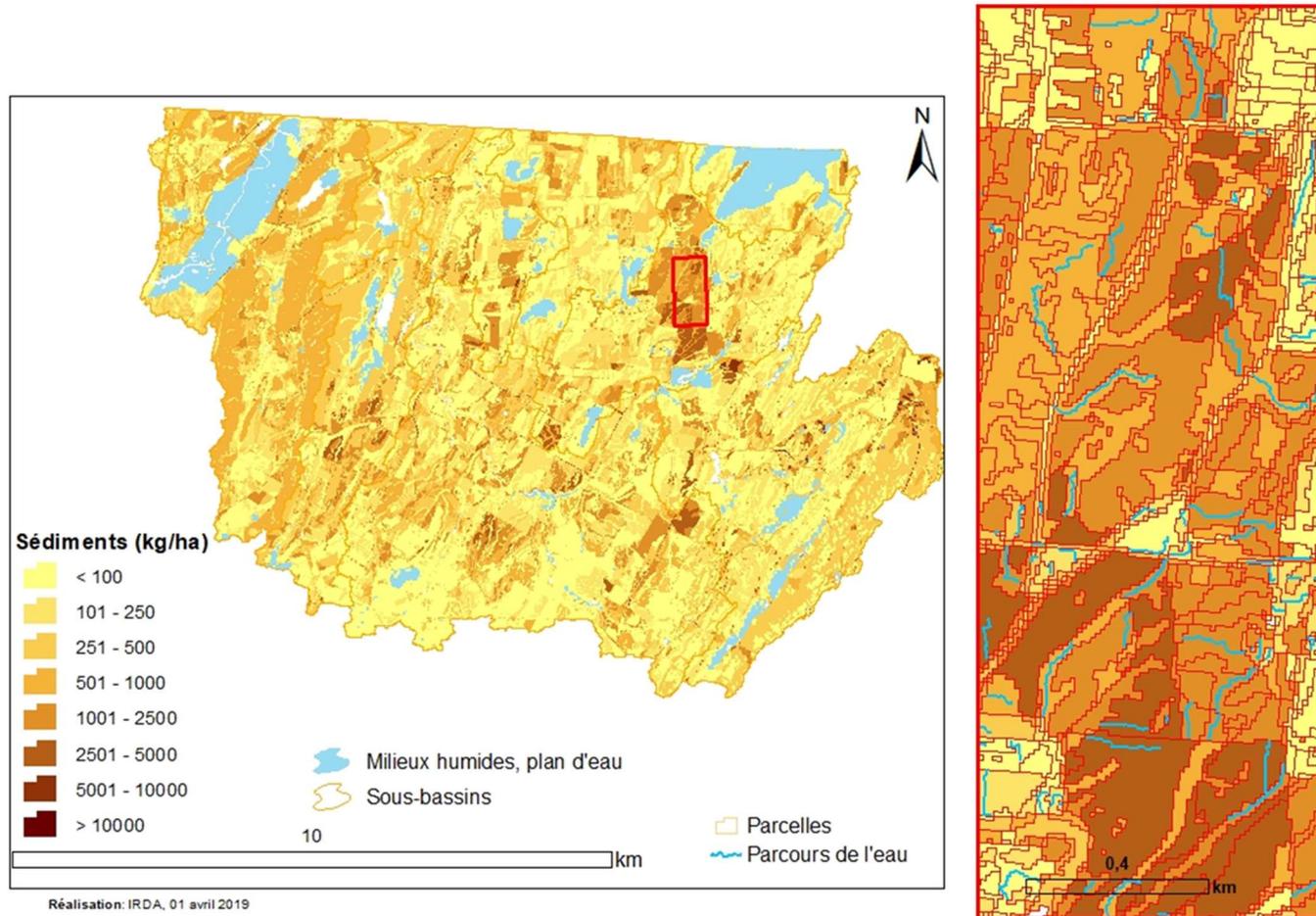


Figure 14. Charge spécifique de sédiments projetée pour la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

Exportation de phosphore du bassin La Roche (Vermont)

Scénario de référence

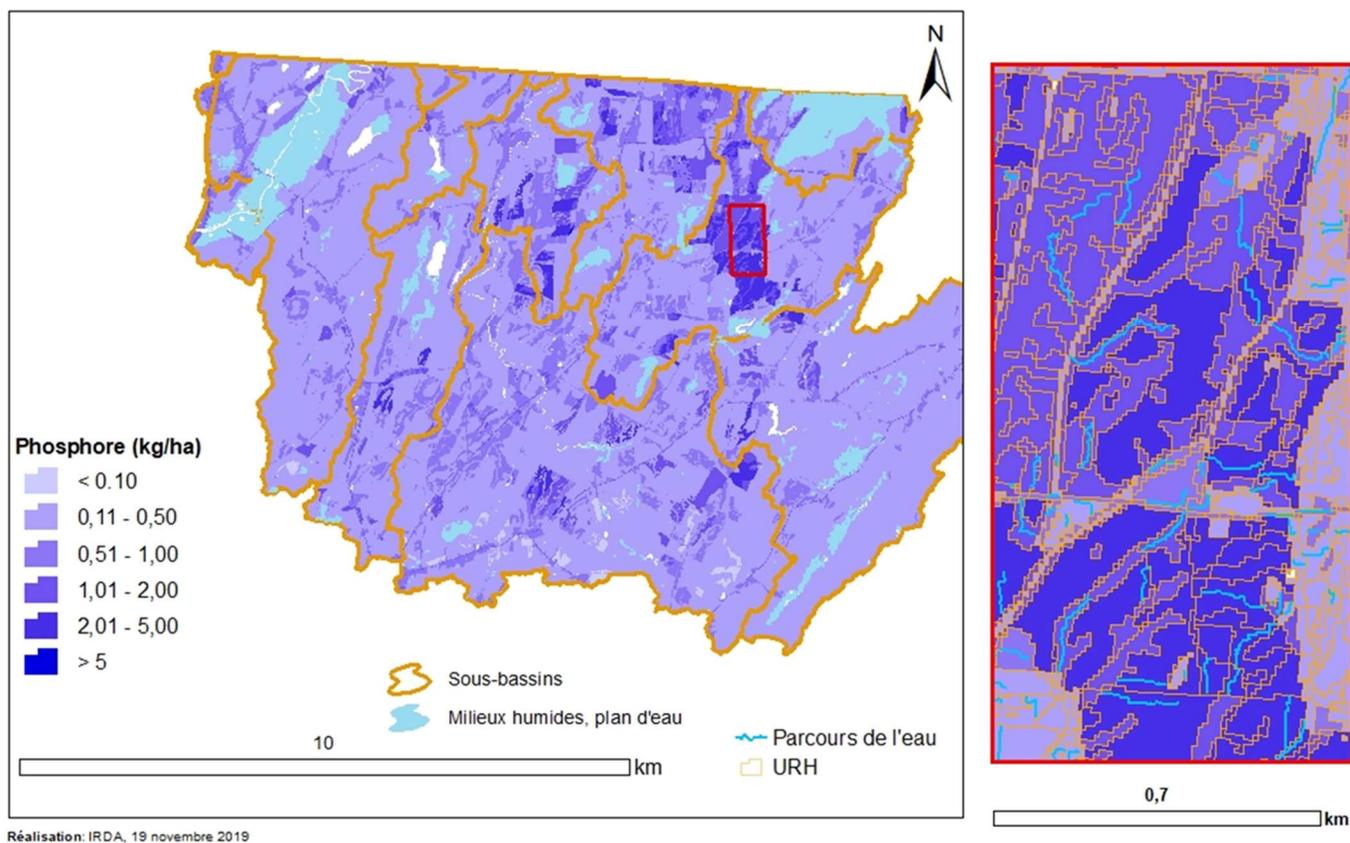


Figure 15. Charge spécifique de phosphore total projetée pour la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

En ce qui a trait aux charges de P, les projections de GÉODEP pour le parcellaire Vermontois et Québécois sont dans un ordre de grandeur similaire. Pour le maïs, les flux annuels moyens projetés sont de 3,11 et 3,15 kg P/ha au Vermont et au Québec, respectivement. Cette projection surprend, à première vue, compte tenu des écarts dans les flux de sédiments projetés. Les différences dans le paramétrage des richesses et saturation en phosphore des sols des deux territoires à l'étude expliqueraient cette apparente incongruité. En effet, pour les fins de la modélisation, les saturations en P (ISP) des sols québécois en culture a été fixé entre 6,8 à 10% (P/Al Mehlich-III) sur la base des données analytiques disponibles (section 2.3). Pour le Vermont, les taux de saturation ont été fixés entre 4,2 et 5,6% (ISP), suivant une projection à partir de leur méthode de dosage (Morgan modifiée). Un gradient aussi important dans les richesses de sol en P se traduit assurément par des projections de flux contrastées dans GÉODEP. En effet, les algorithmes de calcul de la richesse du ruissellement en P du méta-modèle sont fort sensibles à la richesse du sol en P, reflétant l'état des connaissances colligées au Québec sur le sujet.

Tableau 14. Projections des charges annuelles de sédiments (MES) et de phosphore total par classe d'utilisation du sol de la portion Vermontoise du bassin versant de la rivière de la Roche pour le scénario de référence.

Classe d'occupation du sol	Superficie (ha)	Charge MES (kg/an)	Charge spécifique MES (kg/ha-an)	Charge P total (kg/an)	Charge spécifique P total (kg/ha-an)
Prairie	2 772	1 857 316	670	2 950	1.06
Maïs	746	2 962 730	3 973	2 323	3.11
Soja	108	589 283	5 464	499	4.63
Total agricole	3 625	5 409 329	1 492	5 772	1.59
Résidentiel	378	N/D	N/D	272	0.72
Milieux humides	619	129 648	209	446	0.72
Friches	1 098	3 076 316	2 801	198	0.18
Forêt	3 421	1 320 356	386	479	0.14
Routes non pavées	47	310 679	6 572	37	0.78
Routes pavées	47	129 334	2 781	54	1.17
Total non agricole	5 610	4 966 333	885	1 486	0.26
Total Bassin versant	9 236	10 375 661	1 123	7 258	0.79

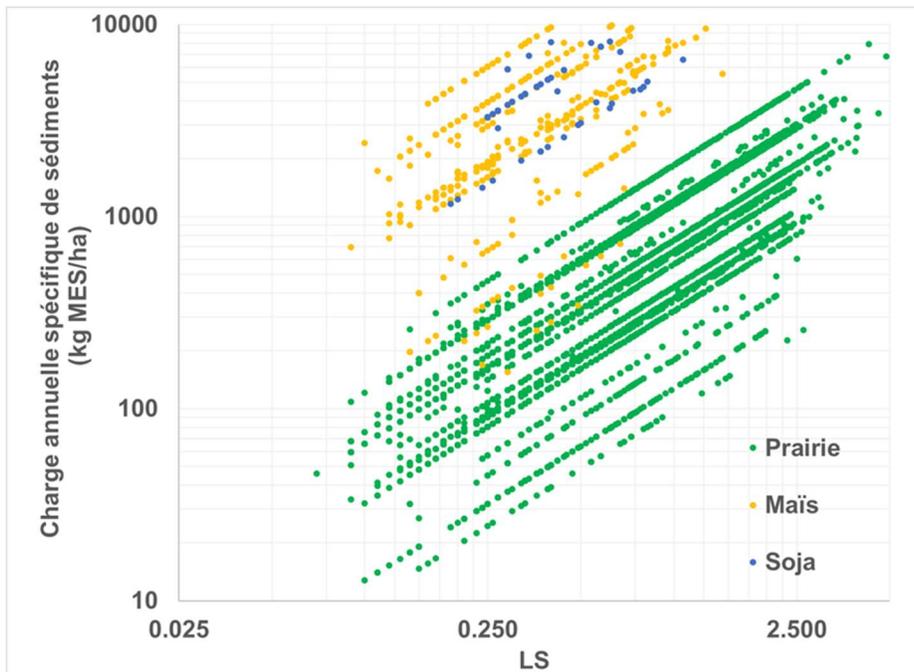


Figure 16. Projections des taux spécifiques d'exportation de sédiments des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche en fonction du facteur topographique LS.

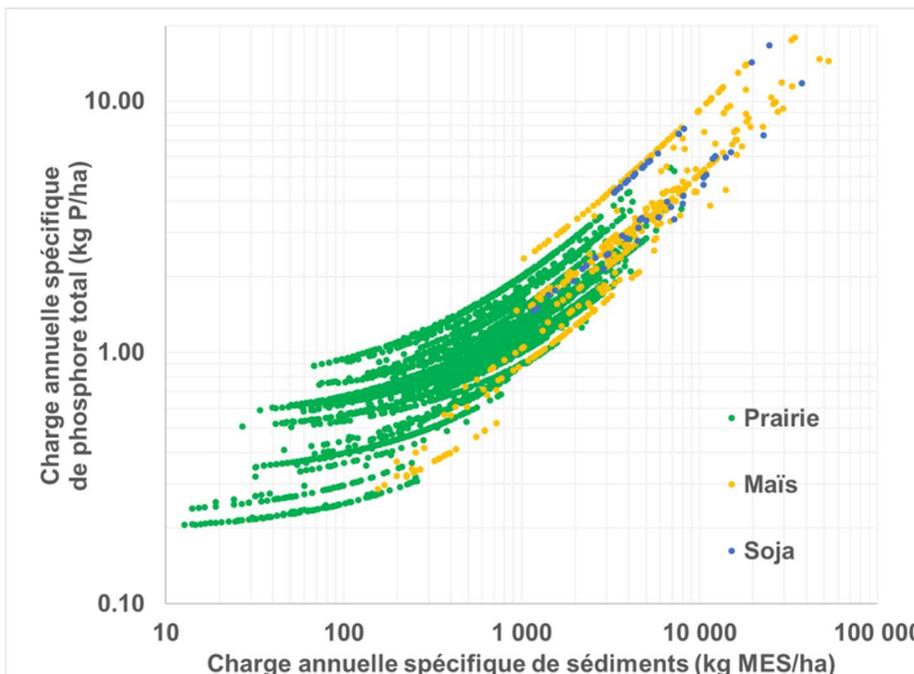


Figure 17. Projections des taux spécifiques d'exportation de phosphore des unités de réponses hydrologiques (URH) en occupation agricole de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche en fonction du taux d'exportation de sédiments.

En bref, les différences méthodologiques dans les estimations des facteurs topographiques et dans le paramétrage des richesses des sols en P sol limitent l'interprétation des différences dans les distributions des flux projetés de sédiments et de phosphore entre les secteurs Vermontois et Québécois du bassin versant. Une plus juste comparaison appellerait à un paramétrage de l'ensemble du territoire sur des bases méthodologiques communes, notamment en ce qui a trait à la définition des unités de parcours de l'eau, de même qu'à la validation des taux de saturation des sols en phosphore.

Les flux projetés de phosphore pour le secteur Vermontois du bassin demeurent néanmoins représentatifs des flux observés à la station hydrométrique, à l'entrée de rivière au Québec. La distribution spatiale des charges du secteur agricole Vermontois est également cohérente avec celle du parcellaire agricole au Québec. (Figure 18). Cette cohérence entre flux projetés et flux observés militent pour une application de l'outil dans un cadre d'accompagnement à la ferme au Vermont. Une telle démarche interpellera cependant la mise à jour des données de gestion à l'échelle parcellaire, à colliger auprès des gestionnaires et conseillers des entreprises agricoles.

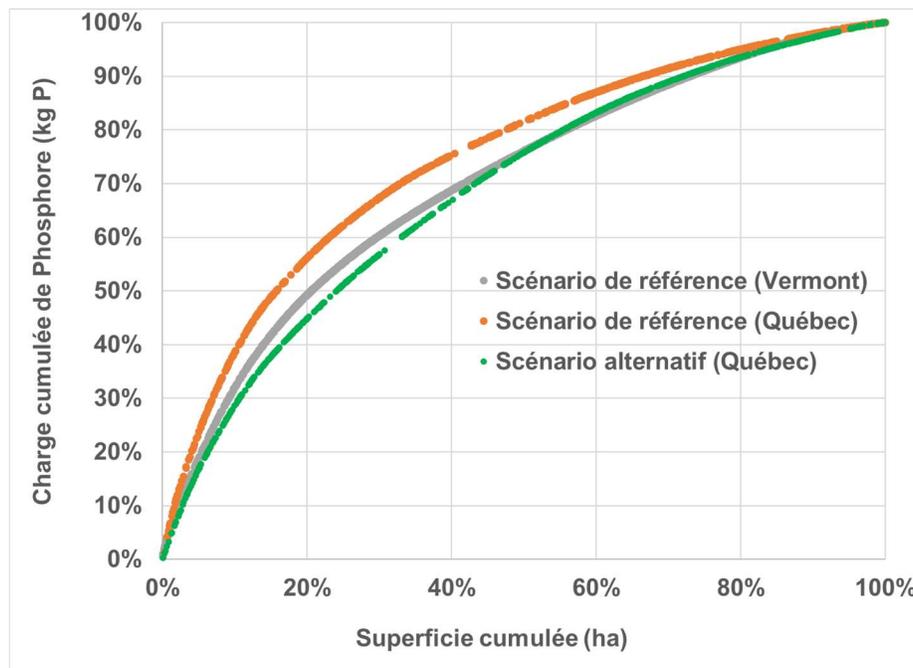


Figure 18. Distribution des charges cumulées de phosphore en fonction de la superficie en culture cumulée pour les scénarios de référence et alternatif de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche et du scénario de référence pour la portion Vermontoise du bassin versant.

3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats de l'exercice de modélisation GÉODEP au Québec et au Vermont témoignent d'un bon ajustement des charges de phosphore projetées par GÉODEP aux flux observés aux stations hydrométriques amont et aval du bassin versant. La plus large part des flux de P est attribuée au secteur agricole au Québec (89%) comme au Vermont (80%). Les flux de P projetés pour le parcellaire agricole sont fortement discriminés sur le plan spatial, suivant des distributions similaires au Québec et au Vermont. Ainsi, 50% de la charge projetée de P du parcellaire agricole origine de 17% (Québec) à 20% (Vermont) de la superficie en culture. Une implication pratique du pouvoir discriminant du méta-modèle est tout l'intérêt d'y recourir dans le ciblage (spatial) des zones critiques d'émission de P, afin d'assurer des retombées tangibles aux investissements dans l'accompagnement du secteur agricole.

La démarche de modélisation du scénario alternatif de gestion a aussi mis en relief des efficacités variables des pratiques à l'étude sur la mobilisation des sédiments et du phosphore. L'efficacité projetée d'une pratique alternative de gestion est en effet déterminée par les propriétés propres au site, notamment le relief, les propriétés physique et chimique du sol (richesse en P) ou son occupation. Une implication pratique du caractère spécifique des efficacités projetées est toute la pertinence du recours à GÉODEP dans l'identification de scénarios alternatifs de gestion dans la mesure où l'outil permet de baliser l'efficacité de différentes avenues dans le contexte propre à une parcelle donnée.

La projection des coûts d'implantation des pratiques de gestion alternative, générée en parallèle à la projection de leurs efficacités respectives, permet enfin de projeter le ratio coût : efficacité des scénarios de gestion à l'étude. Il est dès lors permis d'analyser les répercussions économiques d'une ou plusieurs combinaison de pratiques alternatives données.

Dans le cas de l'étude de la portion Québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche, l'ensemble des superficies où les pratiques étaient applicables ont été retenues dans le scénario alternatif de gestion. Cette projection a permis d'atteindre, en théorie, la cible de 40% de réduction de la charge de phosphore projetée dans le scénario de référence. Concrètement, une infinité de combinaisons de pratiques culturales et d'aménagement des terres, suivant différentes stratégies de ciblage spatial peuvent être générées par le méta-modèle à l'échelle du bassin versant. Les ratios coût : efficacité sont appelés à varier tout autant. Dans un cadre d'action concertée à l'échelle du bassin versant, des réductions optimales des charges de phosphore sont ciblées, impliquant des coûts et des soutiens financiers minimaux. En ce sens, GÉODEP supporte l'analyse et la recherche de solutions qui concilient efficacité au plan environnemental, et efficience au plan économique. L'approche d'optimisation des scénarios d'intervention, à l'échelle du territoire ou d'une entreprise agricole donnée tablera ainsi sur :

- le ciblage des secteurs les plus vulnérables,
- la projection, spécifique aux sites, des efficacités des différentes pratiques alternatives applicables;
- l'optimisation des coûts spécifiques de réduction de la charge de P principalement basée sur le coût d'implantation et des marges sur coûts variables perdue découlant de l'application des pratiques alternatives.

Rappelons que les pratiques retenues dans le scénario de référence et les projections de coûts des pratiques alternatives de gestion dans le cadre de ce projet découlent de collecte de données généralisées au territoire ou disponibles dans la littérature. Elles doivent être considérées à titre indicatif. Dans un cadre d'accompagnement éventuel à la ferme, l'ensemble de données de paramétrage de GéODEP, pertinentes à la régie des cultures (travail du sol, rotation, fertilisation), la richesse du sol ou l'aménagement des terres, commandent une validation auprès des gestionnaires de l'entreprise, afin d'obtenir un portrait le plus fidèle possible de la vulnérabilité du parcellaire. L'analyse des répercussions économiques des scénarios alternatifs de gestion bénéficiera aussi d'une validation des marges brutes en jeux, spécifiques à l'entreprise. GéODEP demeure un outil privilégié pour le conseiller dans l'accompagnement du producteur. A terme, les meilleures solutions demeurent celles que le producteur retiendra.

En terminant, il convient de considérer les implications à long terme d'un scénario d'intervention ciblé en large partie sur les pratiques culturales et les aménagements des terres antiérosifs. Une revue récente des suivis à long terme des effets d'actions centrées sur le contrôle de l'érosion et des charges particulières de P en Amérique du Nord a en effet démontré que les sites de piégeage du P deviennent, à long terme, des sources d'émission de phosphore soluble (Dodd et Sharpley, 2016). Une implication pratique de cet important constat est que la première ligne de défense à long terme, en matière de prévention des exportations de phosphore du parcellaire agricole, demeure la gestion optimale des apports de P et le contrôle de l'enrichissement à long terme des sols en phosphore.

Les engrais de ferme sont principalement ici interpellés, pour plusieurs raisons. D'une part, dans une perspective de bilan de masse, ils constituent la plus large part des apports de P sur les terres de la région à l'étude (36 T P₂O₅), relativement plus importante que les engrais minéraux (19 T P₂O₅), tel que projetés sur la base des bilans d'apports régionaux. Aussi, en raison d'un rapport azote/phosphore (N : P) des engrais de ferme généralement inférieur à celui des besoins des cultures, l'apport de P est généralement excédentaire au besoin des cultures pour la saison en cours. Dans la perspective de limiter l'enrichissement des sols en P pour les éleveurs et les receveurs d'engrais de ferme, il devient dès lors pertinent d'investir en amont de la chaîne de gestion des engrais de ferme, soit de réduire à la source les apports de P.

Les systèmes de séparation des fractions solides et liquides du lisier, par exemple, sont largement utilisés en Europe et leur efficacité a aussi été démontrée en porcherie au Québec (Godbout et al., 2006). La fraction liquide, relativement pauvre en P mais riche en azote, peut alors être valorisée au champ, tout en limitant l'enrichissement du sol en P et en prévenant les pertes de P au cours d'eau. Ce lisier « à teneur réduite en P » devient particulièrement avantageux pour le secteur de grains biologiques, vulnérables à l'enrichissement excessif du sol en P en raison d'une utilisation continue d'engrais de ferme. En ce qui a trait à la fraction solide récupérable (90% du P; Godbout et al., 2006), une richesse élevée en nutriments et un faible taux d'humidité en facilite la valorisation sur des champs plus éloignés, ou hors-ferme, suivant un traitement de séchage, de compostage ou de granulation.

Retenons enfin que dans une perspective économique, le coût élevé de la prévention des exportations de phosphore par les pratiques alternatives de gestion mis en relief dans la présente étude (moyenne de 276\$ par kg de P) milite en faveur de scénarios autonomes de récupération du phosphore au site d'élevage. Bien que les retombées d'une telle avenue n'aient pas été analysées dans cette étude, plutôt ciblée sur les systèmes de cultures et l'aménagement des terres, la séparation des lisiers au site d'élevage conserve toute sa pertinence. L'accompagnement des entreprises d'élevage qui génèrent les plus importants volumes de lisier dans une gestion

séparée des phases solides et liquides des lisiers s'inscrirait en double sur le plan de la prévention de l'eutrophisation à long terme de la rivière de la Roche et la Baie Missisquoi. D'une part, la disponibilité de lisiers appauvris en P contribuera à limiter à long terme l'enrichissement des sols en phosphore dans le bassin versant. Aussi, les fractions solides, assainies, pourraient remplacer les apports en engrais minéraux phosphatés, abaissant ainsi le bilan de global des apports en P dans le bassin versant.

4 RÉFÉRENCES CITÉES

- Banque du Canada. 2019. Feuille de calcul de l'inflation. En ligne : <https://www.banqueducanada.ca/taux/renseignements-complementaires/feuille-de-calcul-de-linflation/>
- Beaudet, P., M. Grenier, M. Giroux, V. Girard. 2009. Base de données sur les statistiques des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec.
- Belzile, 2019. Communications personnelles.
- Biron, P.M, T. Buffin-Bélanger, T. M. Larocque, G. Choné, C_A Cloutier, M.-A. Ouelle, S. Demers, T. Olsen, C. Desjarlais, J. Eyquem. 2014. Freedom Space for Rivers: A Sustainable Management Approach to Enhance River Resilience. *Environmental Management* 54:1056–1073. DOI 10.1007/s00267-014-0366-z
- Biron, P.M, T. Buffin-Bélanger, T. M. Larocque, S. Demers, T. Olsen, C_A Cloutier, M.-A. Ouellet, G. Choné, C._A. Cloutier, M. Needelman. 2013. Espace de liberté: un cadre de gestion intégré pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques. Rapport scientifique de projet. Fonds vert dans le cadre de la mise en oeuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec. 122 p.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC. 2012. Détermination des solides en suspension totaux : méthode gravimétrique, MA. 104 – S.S. 2.0, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, 8 p. http://ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/chimie_inorg.htm#solides_susp GLFC FY18 OBVBM Rock River Pollution Prevention Project, QAPP, Final version NEIWPC Acct#: L-2018-002 NEIWPC JCC: 0100-319-002 August 10th 2018 Page 17 of 40
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC. 2014. Détermination du phosphore total dans les eaux naturelles par minéralisation au persulfate : méthode colorimétrique automatisée et procédures adaptées pour le phosphore de faible concentration et à l'état de trace, MA. 303 – P 5.2, Rév. 2, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 16 p. http://ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/chimie_inorg.htm#elements
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC. 2015. Détermination de l'azote total, des nitrites, des nitrates et de l'azote ammoniacal dans l'eau : méthode colorimétrique automatisée, MA 303 – Nutriments, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 18 p. http://ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/chimie_inorg.htm#elements
- CRAAQ, 2016. Engrais verts semés à la déroché et en intercalaire, Coûts d'implantation. Références économiques. AGDEX 537/821b.
- CRAAQ, 2018b. Blé panifiable d'alimentation humaine – Budget à l'hectare. Références économiques. AGDEX 112/821a. Dodd, R.J. et A.N. Sharpley. 2016. Conservation practice effectiveness and adoption: unintended consequences and implications for sustainable phosphorus management. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 104 : 373-392.
- CRAAQ. 2018a. Foin. Analyse comparative provinciale 2016, analyse de données AGRITEL. Références économiques,. CRAAQ, Agdex 120/891.

- 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 Québec. *Canadian Water Resources Journal* 32(1): 21-42.
- Dodd, R.J. et A.N. Sharpley. 2016. Conservation practice effectiveness and adoption: unintended consequences and implications for sustainable phosphorus management. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 104 : 373-392.
- Drouin, A., I. Beaudin et A. Michaud. 2014. GÉODEP : 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/>
- Gagné G., I. Beaudin, M. Leblanc, A. Drouin, G. Veilleux, J.-D. Sylvain et A.R. Michaud. 2013. Classement des séries de sols minéraux du Québec selon les groupes hydrologiques. Rapport final. IRDA, Québec, Canada. 81 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/classement-des-series-de-sols-mineraux-du-quebec-selon-les-groupes-hydrologiques/>
- Géomont, 2010. Acquisition du levé LiDAR 2011 sur le secteur du bassin versant de la rivière Yamaska
- Géomont. 2011 Relevé LiDAR et DEM de la Montérégie Est.
- Giroux, M., M. Duchemin, A. R. Michaud, I. Beaudin, C. Landry et M.R. Laverdière. 2008. Relation entre les concentrations en phosphore particulaire et dissous dans les eaux de ruissellement et les teneurs en P total et assimilable des sols pour différentes cultures. *Agrosolutions* 19(1) :Pp 4-14.
- Godbout et al. 2006. Système de séparation liquide/solide des déjections à la source dans un bâtiment porcin et les impacts sur l'environnement https://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/godbout-et-al-2006_rapport_separation_sous_lattes.pdf
- Gombault, C., C.A. Madramootoo, A.R. Michaud, I. Beaudin, M.F. Sottile, M. Chikhaoui, F.F. Ngwa. 2016. Impacts of climate change on nutrient losses from the Pike River watershed of southern Québec. *Canadian journal of soil science.* 95: 337 358).
- Gombault, C., M.F.Sottile, F. Ngwa, C.A. Madramootoo, A.R. Michaud, I.Beaudin, M. Chikhaoui. 2015. Modelling climate change impacts on the hydrology of an agricultural watershed in southern Québec. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 1–16.
- 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, E.A., L.S. Clesceri et A.D. Eaton. 1992a. Total Suspended Solids Dried at 103-105oC. Standard method for examination of waste and waster water, 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 waster water, 18th edition, pp 4-112.
- Harlow, S.J. 2018. Farm Progress, July 12th. En ligne (02-05-10): <https://www.farmprogress.com/manure/farmers-see-potential-shallow-manure-injection>

- HIRSCH, R. M., D. L. MOYER ET S. A. ARCHFIELD, 2010. « Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season (WRTDS), With an Application to Chesapeake Bay River Inputs ». *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 46, no 5, p. 857-880. DOI: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1752-1688.2010.00482.x/pdf>
- HIRSCH, R. M., ET L. A. DE CICCO, 2015. « User guide to Exploration and Graphics for RivEr Trends (EGRET) and dataRetrieval: R packages for hydrologic data (version 2.0, February 2015) ». *U.S. Geological Survey Techniques and Methods book 4, chap. A10*, 93 p. <http://pubs.usgs.gov/tm/04/a10/>
- HIRSCH, R. M., S. A. ARCHFIELD ET L. A. DE CICCO, 2015. « A Bootstrap Method for Estimating Uncertainty of Water Quality Trends ». *Environmental Modelling and Software*, vol. 73, p. 148-166. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815215300220> IRDA. 2017. Banque de données hydro-pédologiques.
- HIRSCH, R.M., 2014, Large biases in regression-based constituent flux estimates: Causes and diagnostic tools: *Journal of the American Water Resources Association*, v. 50, no. 6, p. 1401–1424, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jawr.12195/full>
- IRDA. 2018. Site WEB. Diffusion/Publications. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/?EmployeeId=80&TypePubId=&LangId=>
- IRDA. 2018. Études pédologiques. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. <https://www.irda.qc.ca/fr/services/protection-ressources/sante-sols/information-sols/etudes-pedologiques/>
- IRDA. 2019 Banque de données hydro-pédologiques sur les sols du Québec. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.
- Knap, K.M., and W.F. Mildner. 1978. Streambank erosion in the Great Lakes basin: Joint summary technical report. International Joint Commission Reference on Pollution from Land Use Activities Reference Group (IJC-PLUARG) technical report. Great Lakes Reg. Office, Windsor, ON.
- La Financière agricole du Québec, 2017. Banque de données des cultures assurées (BDCA) ou des cultures généralisées (BDCG). <https://www.fadq.qc.ca/documents/donnees/base-de-donnees-des-parcelles-et-productions-agricoles-declarees/>
- Labrie, G., M. Landry et L. Levert-Gauthier. 2018. Portrait des régions des sols et des cultures des entreprises agricoles du bassin versant du Lac Boivin. OBV Yamaska et GestrieSol. Base de données à référence spatiale sur support ARCGIS.
- Lauzier, R. 2009. Contribution des agriculteurs à la production de biens et services environnementaux dans des sous-bassins ciblés de la Baie Missisquoi. Rapport d'analyse du projet NA0169. Agriculture et agroalimentaire Canada. Programme pour l'avancement du secteur canadien de l'agriculture et de l'agroalimentaire. 62 pages.
- Madramootoo, C. A., A. R. Michaud, J. Whalen et S.-C. Poirier. 2012. Mesures précises et approches innovantes en modélisation de la dynamique des nutriments en bassin et en plan d'eau contribuant aux fleurs des cyanobactéries. Rapport final n° 2009-CY-130646. Programme de recherche en partenariat sur les cyanobactéries. Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies et Fonds de la recherche en santé du Québec. 30 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/mesures-precises-et-approches-innovantes-en->

modelisation-de-la-dynamique-des-nutriments-en-bassin-et-en-plan-d-eau-contribuant-aux-fleurs-des-cyanobacteries/

- Martel, S., S. Seydoux, A. R. Michaud et I. Beaudin. 2006. Évaluation des effets combinés des principales pratiques de gestion bénéfiques (PGB). Rapport de recherche, IRDA . 124 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/evaluation-des-effets-combines-des-principales-pratiques-de-gestion-benefiques-pgb/>
- MEDALIE, L., 2013. Concentration, flux, and the analysis of trends of total and dissolved phosphorus, total nitrogen, and chloride in 18 tributaries to Lake Champlain, Vermont and New York, 1990-2011. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013–5021, 29 p. <http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5021/>
- MEDALIE, L., 2014. Concentration and flux of total and dissolved phosphorus, total nitrogen, chloride, and total suspended solids for monitored tributaries of Lake Champlain, 1990-2012. U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1209, 21 p. En ligne : <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141209>
- Michaud, A. R., N.-R. Rocha Medrano, R. Lagacé et A. Drouin. 2014a. Développement et validation de méthodes de prédiction du ruissellement et des débits de pointe en support à l'aménagement hydro-agricole. Rapport final présenté au CDAQ dans le cadre du PCAA. IRDA. 142 p. <http://www.irda.qc.ca/fr/publications/developpement-et-validation-de-methodes-de-prediction-du-ruissellement-et-des-debits-de-pointe-en-support-a-l-amenagement-hydro-agricole/>
- Michaud, A.R, J. Desjardins, M. Grenier et R. Lauzier. 2009b. Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et 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, M. Dubuc, A. Drouin, M. Grenier. 2017. Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles réseau Champlain, Mauricie. Rapport scientifique de projet. 81 pages. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/observatoire-de-la-qualite-de-l-eau-de-surface-en-bassins-versants-agricoles-reseau-champlain-mauricie/>
- Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C. A. Madramootoo. 2007. SWAT-predicted influence of different landscape and cropping systems alterations on phosphorus mobility within the Pike River watershed of South-western Québec. 2007. Canadian journal of soil science 87(3) 329-344.
- Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012a. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport sommaire pour la période de référence 2009-2011. Rapport réalisé dans le cadre du projet Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Québec, Canada. 87 pages et annexes. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/197.html>
- Michaud, A.R., 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., 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 Castor, tributaire de la rivière aux Brochets, Québec. *Agrosol* 16(1), pp. 57-59.
https://www.researchgate.net/publication/274762064_Cropping_soil_type_and_manure_application_effects_on_phosphorus_export_and_bioavailability
- Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beaudet et J. Lagacé. 2008. ODEP; un Outil de diagnostic des exportations de phosphore. Manuel de l'utilisateur. Projet « Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec », réalisé dans le cadre de l'Initiative d'appui aux conseillers agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada. <https://www.irda.qc.ca/fr/outils-et-services/odep/>
- Michaud, A.R., M. Niang, A. Blais-Gagnon et F. Landry. 2017. Outil-de-diagnostic-et-de-prediction-des-exportations-diffuses-de-sediments-et-nutriments (GéODEP+N). Projet de recherche. Programme Innovation. <https://www.irda.qc.ca/fr/projets/outil-de-diagnostic-et-de-prediction-des-exportations-diffuses-de-sediments-et-nutriments-geodep-n/>
- Michaud, A.R., M. Niang, A. Blais-Gagnon, W. Huertas, Z. Ipiña et M. Landry. 2018. Suivi hydrométrique et modélisation hydrologique des sédiments et des nutriments du bassin versant du Lac Boivin à Granby. Rapport scientifique final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), OBV- Yamaska. 79 pages plus annexes.
- 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 No. IA113111, Programme Innov'action agroalimentaire, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 68 pages.
- Michaud, A.R., M.A. Niang, F. Landry, W. Huertas, G. Labrie et M. Landry. 2018. Suivi hydrométrique et modélisation hydrologique des sédiments et des nutriments des bassins versants de la MRC de la Haute Yamaska. Rapport scientifique final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), OBV- Yamaska. 95 pages plus annexes.
- Michaud, A.R., S-C Poirier et J.K Whalen. 2019. Tile Drainage as a Hydrologic Pathway for Phosphorus Export from an Agricultural Subwatershed. *Journal of Environmental Quality*. 48: 1: 64-72 doi:10.2134/jeq2018.03.0104
- Ministère de l'environnement et de la lutte aux changements climatiques du Québec (MELCC). 2014. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables décret 702-2014. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/EAU/rives/>
- Ministère des ressources naturelles du Québec, 2010. Carte écoforestière. [http://iris.banq.qc.ca/alswww2.dll/APS_CAT_IDENTIFY?Method=CatalogueExplore&IsTagged=0&DB=BookServer&ExploreType=Subject&Stem=SIEF%20\(Syst%C3%A8me%20d%27inf](http://iris.banq.qc.ca/alswww2.dll/APS_CAT_IDENTIFY?Method=CatalogueExplore&IsTagged=0&DB=BookServer&ExploreType=Subject&Stem=SIEF%20(Syst%C3%A8me%20d%27inf)

ormation)%20&Style=Portal3&SubStyle=&Lang=FRE&ResponseEncoding=utf-8&Parent=Obj_55181311766356

- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 2016. Bilan de phosphore. Portrait des années 2011 à 2013. 46 pages. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/>
- Murphy, J., et J.R. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphates in surface waters. *Anal. Acta* 27:31-36.
- OBV Yamaska, 2018. Caractérisation, portrait et plan d'action du bassin versant du Lac Boivin – rapport phase I, pour le programme Prime-Vert Volet 2.1, Organisme de bassin versant de la Yamaska, 87 pages
- Roux. C. 2012. Portrait hydrogéomorphologique d'un bassin versant Agricole et processus de ré-méandrisation: Le cas de la Baie de Lavallière au Québec. Department of Fluvial Geomorphology of Concordia University, Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) Et Département de Mécanique de l'Université de Lyon. Montréal. 50 p+ annexes.
- Sharpley, A.N., W.W. Troeger et S.J. Smith. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *J. Env. Qual.* 20:235-238.
- Simoneau, M. 2018. Personnel communication. Sediment, nitrogen and phosphorus loadings estimates for Rock river stations 1999-2015. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC). Direction générale du suivi de l'état de l'environnement (DGSEE), Direction de l'information sur les milieux aquatiques (DIMAQ).
- Simoneau, M. 2018. Qualité de l'eau des tributaires de la baie Missisquoi : évolution temporelle 1999-2017 et portrait récent 2015-2017. Version préliminaire. Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 92 p. + 12 ann.
- Tartera, 2019. Communication personnelle. Calculateur des coûts d'implantation et d'entretien des bandes riveraines herbacées, arbustives et arborescentes. Groupe ProConseil.
- Thibaudeau, S. 2017. Fiche synthèse. Adaptation des techniques d'implantation des SCV en grandes cultures. Club agroenvironnemental du bassin la Guerre. Prime-Vert MAPAQ Volet 4 : Appui au développement et au transfert de connaissances en agroenvironnement.
- University of Vermont. 2010. Rock river watershed DEM released by the University of Vermont Spatial Analysis Laboratory.
- USDA-NCRS. 2001. National Soil Survey Handbook.
- USDA-NRCS. 2009. SSURGO datasets.
- Vermont Center for geographic information. 2018. Geodata Portal. <https://vcgi.vermont.gov/opendata>
- Vermont Geodata Portal. 2018. <http://geodata.vermont.gov/datasets?q=missisquoi%20lidar>
- Wall, G.J., D.R. Coote, E.A. Pringle and I.J. Shelton (editors). 2002. RUSLEFAC — Revised Universal Soil Loss Equation for Application in Canada: A Handbook for Estimating Soil Loss from Water Erosion in Canada. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa. Contribution

- No. AAFC/AAC2244E. 117 pp. Walker, W. 1998. Flux, Stream loads computations, version 5.0. Environmental laboratory USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi, USA.
- Wang, D. S.N. Levine, D.W. Meals, Jr., J.P. Hoffman, J.C. Drake et E.A. Cassell. 1999. Importance of instream nutrient storage to P export from a rural eutrophic river in Vermont, USA. P. 205-224. In Lake Champlain in Transition: From Research toward Restoration. Water Science and Application 1. American Geophysical Union. P.225-238.
- 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 I. Données utilisées en intrants dans la création de scénarios de gestion dans GÉODEP.

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

Argile %	Contenu en argile de la couche arable (%)
Gr_hydro	Groupe hydrologique du sol non drainé (3, 5, 7 ou 9)
MO	Contenu en matières organiques de la couche arable (%)
Ptot naturel	Contenu en P total naturel du sol (mg/kg)

Annexe II. Méthode d'estimation de la charge de phosphore liée à la perte événementielle suivant des épandages d'engrais de ferme non incorporé

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

L'enrichissement du ruissellement en P dissous (ΔPRD_{EF}) est estimé sur la base de la concentration estimée en P dissous par GÉODEP sans amendement organique. Cet accroissement moyen découle de mesures en réseau de 36 parcelles (Michaud et Laverdière, 2004; 18 prairies et 18 sol nu, trois séries de sol) avec ou sans une dose d'apport de P de 60 kg P/ha de lisier. La relation suivante a été établie en mettant en relation les concentrations observées en P dissous des parcelles avec amendement (59 kg P/ha) vs les concentrations observées pour les mêmes combinaisons de série de sol et de condition de surface (prairie et sol nu), mais sans amendement

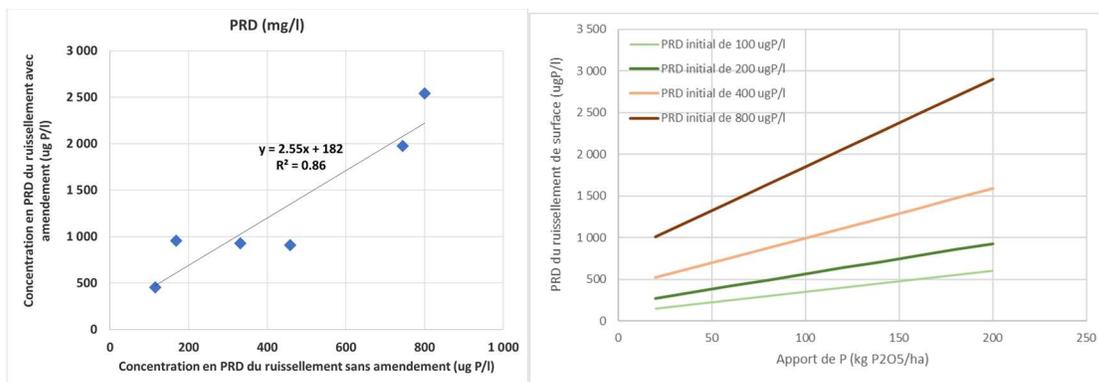
$$\Delta P_{diss_{EF}} = (1.55 (P_{diss}) + 182) * (Dose_FUM_P2O5 * 0.4364 / 59) * F_{Période}$$

$$R^2 = 0.69$$

Où :

- $\Delta P_{diss_{EF}}$ est l'enrichissement de la concentration du ruissellement en P dissous (ug/l);
- P_{diss} est la concentration estimée par GÉODEP, sans prise en compte de l'amendement (ug/l), tel que calculée sur la base de la saturation P/AI.
- Dose_FUM : est la dose de P (kg P2O5) provenant de l'engrais de ferme (le facteur 0.4364 convertit les unités d'apports en P2O5 dans GÉODEP en P);
- $F_{Période}$ est le facteur de période (Printemps et Automne : valeur de 1; Été et automne hâtif : valeur de 0.5).

Par la suite, $\Delta P_{diss_{EF}}$ est ajoutée à la valeur projetée de P_{diss} (sans engrais de ferme), pour produire la valeur finale de P_{diss} dans GÉODEP.



(Adapté de Michaud et Laverdière, 2004) Illustration du modèle

Exemple de calcul : Une saturation P/AI de 4% implique une conc. P_{diss} de 100 ug P/l (sans engrais de ferme). L'application de lisier (dose de 100 kg P2O5) non incorporé à l'automne ou au printemps implique un accroissement d'environ 400 ug p/l pour une concentration finale de 500 ug/l en P_{diss} (aprox).

Approche de codification

1. Calculer pour chaque apport d'engrais de ferme non incorporé l'enrichissement de la concentration en P diss (ug/l):

Si FUM_Dose 1 > 0, Et FUM_Mode 1 = 4 (non incorporé)

Si FUM_PER1 = 1 Ou 4, F_{Période} = 1.0

Si FUM_PER1 = 2 ou 3, F_{Période} = 0.5

Calculer : $\Delta P_{dissEF(1)} = (1.55 (P_{diss}) + 182) * (Dose_FUM_P2O5 * 0.4364 / 59) * F_{Période}$

Répéter pour Fum_Dose2 et Fum_dose 3 pour calculer $\Delta P_{dissEF(2)}$ et $\Delta P_{dissEF(3)}$

2. Calculer l'enrichissement total de la concentration en P diss liée à l'apport non incorporé d'engrais de ferme :

$\Delta P_{dissEF(Tot)} = \Delta P_{dissEF(1)} + \Delta P_{dissEF(2)} + \Delta P_{dissEF(3)}$

3. Calculer la concentration en P diss final

$P_{diss\ final} = P_{diss} + \Delta P_{dissEF(Tot)}$

Où : P_{diss} est la conc. calculée sur la base de la saturation en P/Al dans GÉODEP

($P_{diss} = 17.8 * P-SAT + 50$)

Calculer la charge en P diss (kg/ha) sur la base de projection de la hauteur de ruissellement

$P_{diss\ surf} = P_{diss} * Q_{ruiss}$