

RAPPORT FINAL

ÉTUDE DE CAS DU BASSIN VERSANT DU RUISSEAU PARENT, AFFLUENT DE LA RIVIÈRE BULSTRODE



23 JUIN 2020

PARTENAIRES DE RÉALISATION

irda
INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT

COPERNIC
organisme de COordination Pour l'Eau
des bassins versants de la Rivière Nicolet
www.copernicinfo.qc.ca

ÉTUDE DE CAS DU BASSIN VERSANT DU RUISSEAU PARENT, AFFLUENT DE LA RIVIÈRE BULSTRODE

Présenté à :

COPERNIC

ATTN: Karine DAUPHIN, M.SC.Env.

Directrice générale

1000 rue Champoux

Saint-Albert (Qc) JOA 1E0

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Aubert Michaud, IRDA
- Mohamed Niang, IRDA
- William Huertas, IRDA

COLLABORATEURS

- Karine Dauphin, COPERNIC
- Marie Anne Sylvestre-Loubier, COPERNIC
- Rémi Gaudreau, COERNIC
- Nicolas Paris Lafrance, GCABF

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Michaud, A.R., M.A. Niang, et W. Huertas, 2020. ÉTUDE DE CAS DU BASSIN VERSANT DU RUISSEAU PARENT, AFFLUENT DE LA RIVIÈRE BULSTRODE. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), COPERNIC. 34 pages plus annexe.

Table des matières

1. Introduction.....	6
2. Description du site d'étude	6
3. Méthode de modélisation hydrologique.....	12
3.1 Paramétrage du modèle.....	13
3.2 Scénarios de gestion du parcellaire	17
4. Résultats de la simulation hydrologique	21
5. Analyse coûts : efficacité des pratiques alternatives de gestion	23
6. RÉFÉRENCES CITÉES.....	31
7. Annexe I: Données utilisées en intrants dans la création de scénarios de gestion dans GéODEP	34

Liste des tableaux

Tableau 1. Occupation du sol du bassin versant du ruisseau Parent.	8
Tableau 2. Bilan des hauteurs d'eau et des flux de sédiments pour la période de novembre 2017 à avril 2020 pour les six stations hydrométriques du bassin versant de la rivière Bulstrode.	12
Tableau 3. Distribution des classes de drainage des champs du bassin versant du ruisseau Parent retenue pour la simulation GÉODEP.....	19
Tableau 4. Distribution des classes de travail du sol des champs du bassin versant du ruisseau Parent retenue pour la simulation GÉODEP.....	20
Tableau 5. Charges annuelles totales et spécifiques (par unité de surface) de sédiments projetés pour les classes d'occupation du sol du bassin versant du ruisseau Parent en scénario de référence.	21
Tableau 6. Charges annuelles de sédiments projetées pour les superficies en culture du sous-bassin versant du ruisseau Parent suivant le scénario de gestion de référence et le scénario de gestion alternatif ciblé sur la prévention de l'érosion des sols.	22
Tableau 7. Analyse coûts : efficacité en termes de réduction des charges de sédiments associée au travail réduit du sol des superficies en maïs grain pour le bassin versant du ruisseau Parent.	25
Tableau 8. Différences dans les coûts de production associées à la conversion de la pratique culturale de labour vers le travail réduit du sol et le semis direct en production de maïs grain.....	25
Tableau 9. Analyse coûts : efficacité en termes de réduction des charges de sédiments et de phosphore (P) associée aux cultures de couverture implantées dans les superficies en soja pour le bassin versant du ruisseau Parent.	26
Tableau 10. Analyse coûts : efficacité en termes de réduction des charges de sédiments associée à l'aménagement de bandes riveraines élargies et de structures de captage et de sédimentation des superficies en culture annuelles du bassin versant du ruisseau Parent.....	28
Tableau 11. Synthèse de l'analyse des coûts et des efficacités, en termes de réduction des charges de phosphore (P) et de sédiments, des scénarios cumulés de mesures agroenvironnementales appliqués à l'ensemble du bassin versant du ruisseau Parent.	29

Liste des figures

- Figure 1. Localisation du sous-bassin versant du ruisseau Parent et de l'ensemble des stations hydrométriques du réseau d'étude de la rivière Bulstrode. 7
- Figure 2. Occupation du sol (a), modèle numérique d'élévation (b) et pédologie du bassin versant du ruisseau Parent (c). La cartographie de l'occupation de l'ensemble du bassin versant (d) souligne le contraste entre les vocations forestière du secteur amont et agricole du secteur aval. 9
- Figure 3. Localisation (a) et dispositifs de mesures hydrométriques à la station Parent, incluant le courantomètre à effet doppler installé au fond de la section d'écoulement et la sonde multi-paramètres installée dans le cylindre de PVC (b), et le boîtier électrique (panneau solaire intégré; C). Aussi, photographies de la station en crue lors du redoux de février 2018 (d). 10
- Figure 4. Précipitations, lames d'eau et flux journaliers de sédiments estimés à la station Parent (Michaud et Huertas, 2020). 11
- Figure 5. Illustration des différentes étapes de traitement des données à référence spatiale dans GéODEP pour une portion de territoire à vocation agricole. 16
- Figure 6. Hauteur de ruissellement (a), charge spécifique de sédiments (b) et de phosphore (c) projetées pour le bassin versant du ruisseau Parent par simulation avec le méta-modèle GéODEP pour le scénario de gestion agricole de référence. 22

1. Introduction

Le réservoir Beaudet, situé en bordure de Victoriaville, constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable pour cette municipalité. Ce réservoir a été créé en 1977 par un élargissement de la rivière Bulstrode. L'ensablement graduel du réservoir a mené à une réduction significative de sa capacité. Par conséquent, la Ville de Victoriaville souhaite procéder à une restauration du réservoir, qui inclura notamment l'excavation de sédiments déposés au fond de celui-ci.

Afin de développer un plan de restauration intégré qui permettra de minimiser les besoins d'entretien du réservoir dans le futur et en appui à la Ville de Victoriaville, l'Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet (COPERNIC) a mandaté l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA), le laboratoire de gestion des rivières de l'Université Concordia et la firme CIMA+ pour dresser un portrait de la dynamique sédimentaire à l'échelle du bassin versant de la rivière Bulstrode, en vue d'identifier des pratiques à mettre en place pour diminuer l'apport de sédiments au réservoir Beaudet. Dans ce mandat, l'IRDA est responsable des volets d'hydrométrie (monitorage des débits et flux de sédiments en rivière) et d'études en modélisation hydrologique. Ce dernier volet implique notamment la projection de l'atténuation des flux de sédiments d'un affluent agricole de la rivière, le ruisseau Parent, en réponse à une action concertée des entreprises agricoles ciblée sur la prévention de l'érosion au champ. Ce document présente sommairement l'approche retenue pour la réalisation de ce volet d'étude en suivant une approche de modélisation hydrologique des flux de sédiments exportés du bassin versant. Les exportations projetées en situation actuelle sont comparées à celles découlant d'une projection de scénarios d'aménagement des terres et d'implantation de pratiques culturales anti-érosives proposés par une coalition d'entreprises agricoles dédiée à la mise en valeur du bassin versant de la rivière Bulstrode.

2. Description du site d'étude

Le bassin versant du ruisseau Parent est localisé dans le secteur aval du bassin versant de la rivière agricole. La figure 1 illustre la localisation du bassin versant du ruisseau Parent, sa station hydrométrique ainsi que l'ensemble des stations hydrométriques du réseau d'étude de la rivière Bulstrode. Essentiellement à vocation agricole, le paysage du bassin du ruisseau Parent est relativement plat, reflétant la zone de transition entre les régions physiographiques de la plaine du Saint-Laurent et les basses terres appalachiennes. La figure 2 illustre le relief, le réseau hydrographique, la pédologie et l'occupation des sols du bassin versant. Les terres en culture dominent l'occupation du territoire (83%), alors que l'importance des prairies témoigne de la vocation laitière du bassin versant (tableau 1). La série de sol Melbourne, de texture franche (loam), est associée à une classe de drainage de bon à modérément bon. Elle couvre la plus large

partie du bassin. La forte composition en limon du loam Melbourne (47%) confère au sol une forte érodabilité. Les pentes douces à modérées limitent cependant les processus érosifs.

Le suivi hydrométrique du ruisseau Parent réalisé par l'équipe scientifique de l'IRDA témoigne de la vulnérabilité du bassin versant à l'érosion hydrique et aux exportations de sédiments. À l'instar des autres stations du réseau, le dispositif en place permet de décrire en continu, tout au long de l'année, les réponses hydrologiques et les flux de sédiments du ruisseau Parent, juste en amont de sa confluence avec la rivière Bulstrode. Les équipements en place (figure 3) permettent de documenter en continu l'évolution des débits, la séparation des écoulements en ses composantes de surface et souterraine, de même que les flux de sédiments. Suivant un dispositif expérimental de bassins jumeaux, le suivi hydrométrique du bassin Parent est jumelé à celui du ruisseau Perreault, aussi à vocation agricole (figures 1 et 2). Ce dispositif est adapté à la détection d'une réponse éventuelle de la qualité de l'eau aux actions anti-érosives mises en place dans le bassin Parent, en utilisant les données de suivi hydrométrique du bassin Perreault comme témoin.

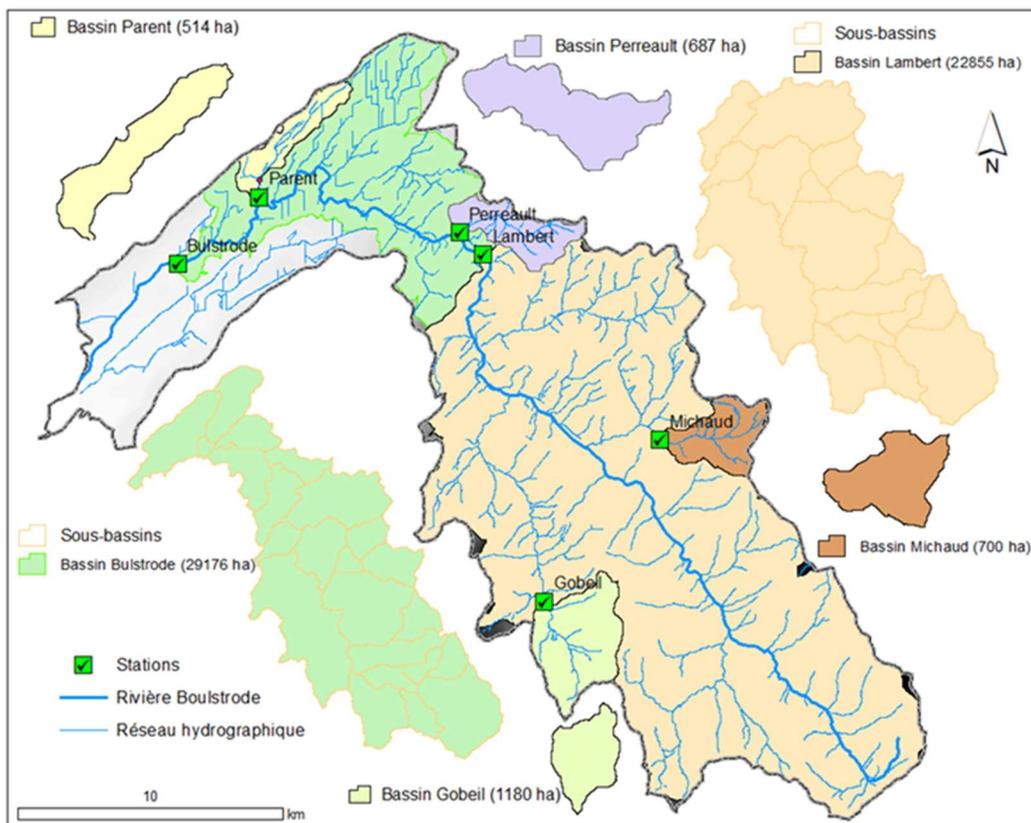


Figure 1. Localisation du sous-bassin versant du ruisseau Parent et de l'ensemble des stations hydrométriques du réseau d'étude de la rivière Bulstrode.

Tableau 1. Occupation du sol du bassin versant du ruisseau Parent.

Occupation du sol	Superficie (ha)
Prairie	252.92
Céréales à paille	44.89
Maïs ensilage	2.21
Maïs grain	72.01
Soya	49.57
Forêts	22.55
Friches	58.27
Routes non pavées	4.60
Routes pavées	0.14
Total agricole	421.60
Total	507.16

La figure 4 illustre les séries journalières de précipitations, de lames d'eau du ruisseau et des flux journaliers de sédiments estimés à la station Parent pour la période de novembre 2017 à avril 2020. Les charges sédimentaires observées se concentrent en quelques événements de crue comportant une forte composition de ruissellement de surface. Ces épisodes sont principalement associés aux redoux hivernaux, à l'intense épisode de fonte d'avril 2018 de même qu'à la fonte des neiges exacerbée par le printemps particulièrement pluvieux de 2019. L'importante crue du 31 octobre au 1er novembre 2020 fait exception, alors que plus de 70 mm de précipitation sur des sols largement saturés génère une lame de ruissellement et une charge de sédiments très importante.

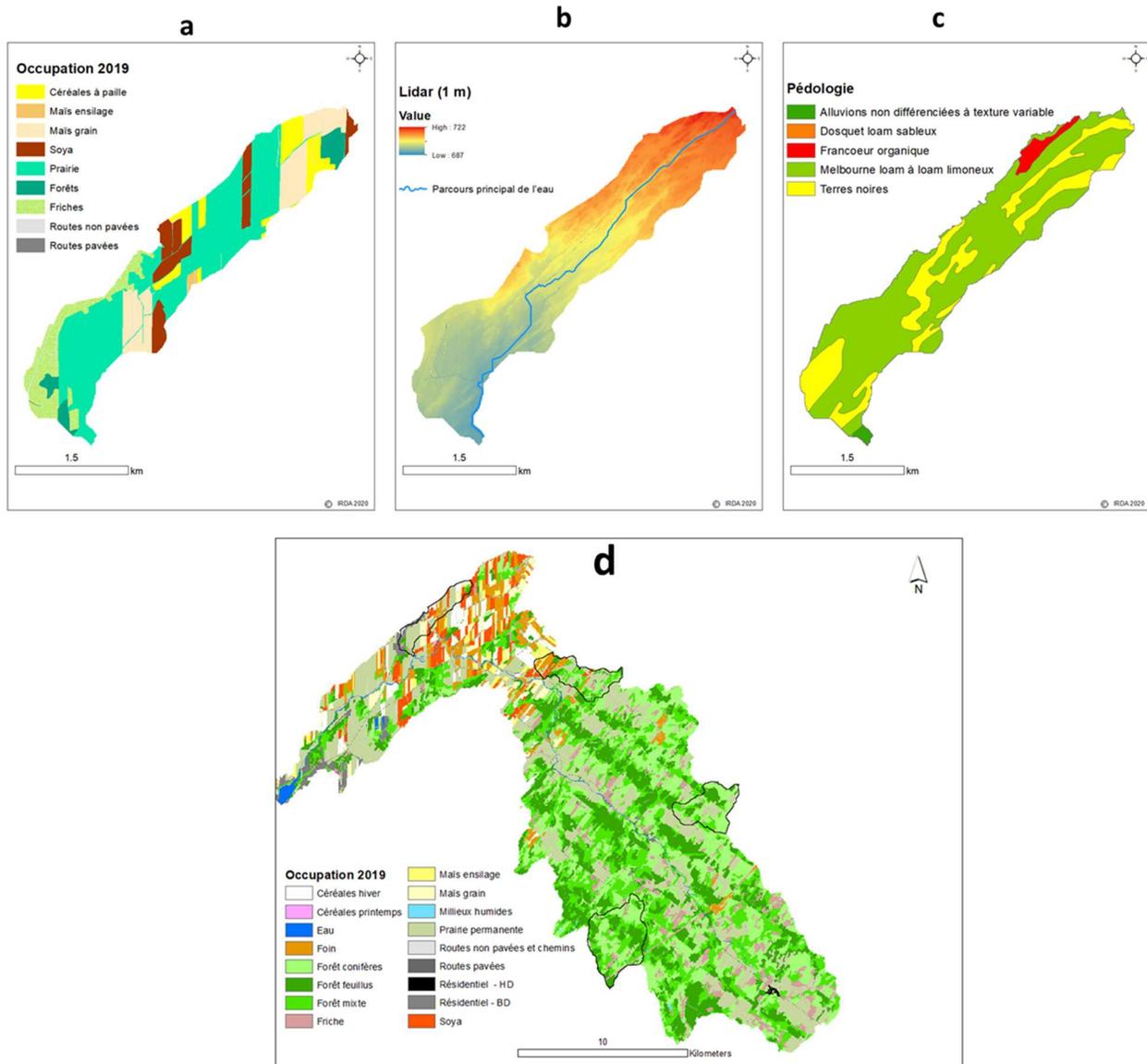


Figure 2. Occupation du sol (a), modèle numérique d'élévation (b) et pédologie du bassin versant du ruisseau Parent (c). La cartographie de l'occupation de l'ensemble du bassin versant (d) souligne le contraste entre les vocations forestière du secteur amont et agricole du secteur aval.



Figure 3. Localisation (a) et dispositifs de mesures hydrométriques à la station Parent, incluant le courantomètre à effet doppler installé au fond de la section d'écoulement et la sonde multi-paramètres installée dans le cylindre de PVC (b), et le boîtier électrique (panneau solaire intégré; C). Aussi, photographies de la station en crue lors du redoux de février 2018 (d).

Rapportée sur une base annuelle, l'exportation de sédiments (matières en suspension (MES)) du ruisseau Parent est de l'ordre de 119 tonnes métriques pour la période d'étude. À l'échelle du bassin versant, cette exportation de sédiments correspond à une charge spécifique de 232 kg/ha par an. La comparaison des séries de flux de sédiments avec celles du bassin Perreault (127 kg MES/ha par an), aussi en occupation agricole, met en relief des distributions contrastées entre les sous-bassins versants (tableau 2). Alors que le sous-bassin Perreault témoigne de maxima journaliers de débits spécifiques plus importants, reflétant la nature de son relief, le ruisseau Parent est sujet à des épisodes de transport de sédiments plus intenses. Une occupation agricole relativement plus importante et la proportion de cultures annuelles plus élevée dans le sous-bassin Parent expliquerait ces émissions plus intenses de sédiments en suspension.

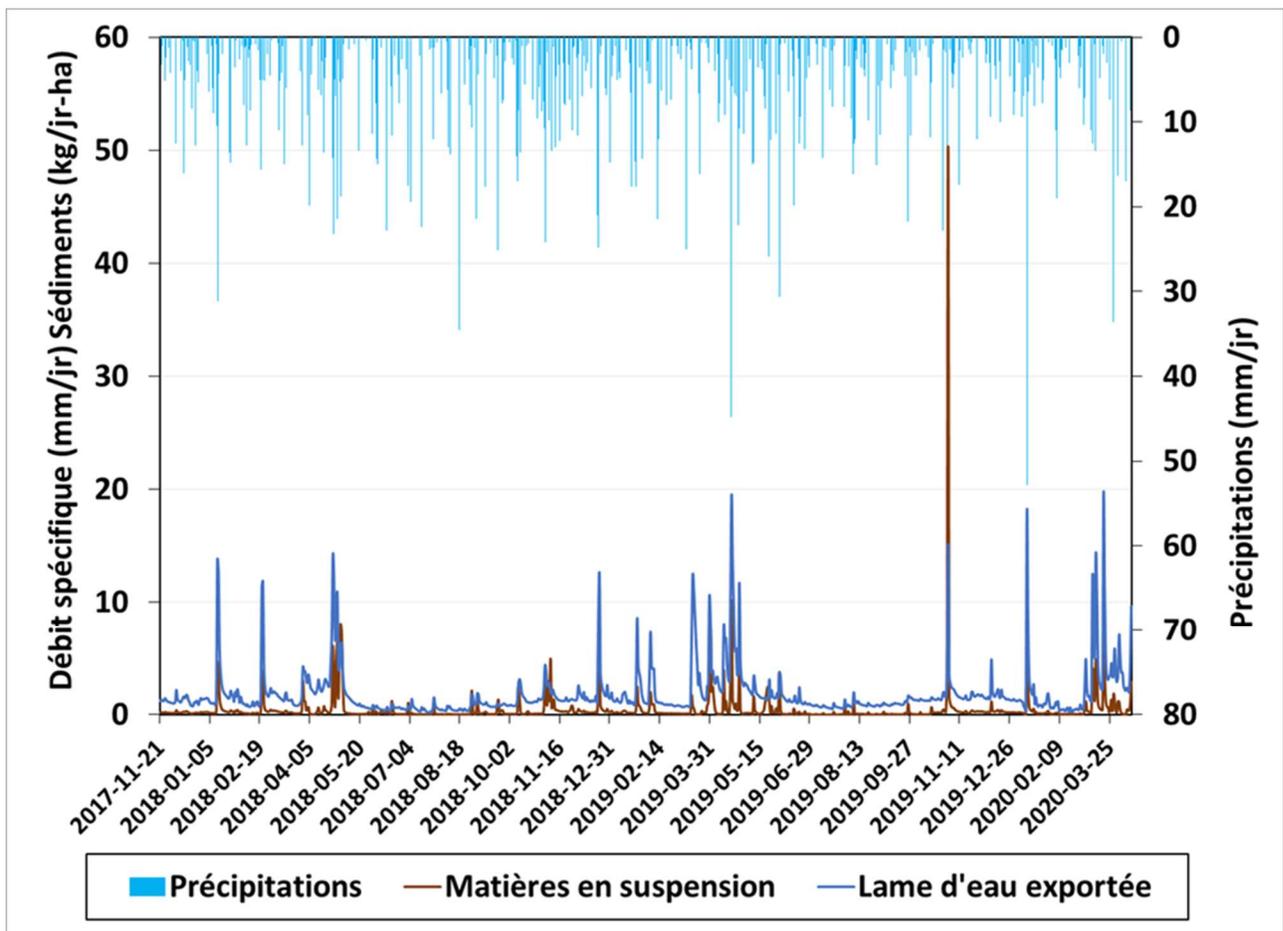


Figure 4. Précipitations, lames d'eau et flux journaliers de sédiments estimés à la station Parent (Michaud et Huertas, 2020).

Tableau 2. Bilan des hauteurs d'eau et des flux de sédiments pour la période de novembre 2017 à avril 2020 pour les six stations hydrométriques du bassin versant de la rivière Bulstrode.

Sous-bassin	Superficie du sous-bassin (ha)	Durée du suivi (jr)	Volume d'eau annualisé (m3)	Hauteur d'eau annualisée (mm/an)	Exportation de sédiments annuelle (T/an)	Exportation de sédiments annuelle spécifique (kg/ha-an)
Parent	515	876	3 583 039	696	119	232
Perreault	687	875	4 733 115	689	88	127
Gobeil	1 180	880	9 520 327	807	96	81
Michaud	700	876	5 731 145	819	107	153
Lambert	22 855	736	225 073 840	985	8 370	366
Bulstrode	29 176	736	291 417 575	999	10 378	356

3. Méthode de modélisation hydrologique

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 l'ensemble du bassin versant du ruisseau Parent. Un premier paramétrage du méta-modèle appliqué au bassin versant du ruisseau Parent, nommé « Scénario de gestion agricole de référence », a été réalisé sur la base des données colligées par le Groupe Conseil Agro Bois Francs (GCABF, 2019a) auprès des entreprises agricoles du bassin versant de la rivière Bulstrode. L'information rassemblée comprend notamment une description des régies des sols et des cultures (rotation, travail du sol, gestion des fumiers, propriétés des bandes riveraines et de l'aménagement des terres). Les flux de sédiments et de nutriments mesurés à la station hydrométrique du ruisseau Parent ont servi de balises pour le paramétrage et la validation de la performance du méta-modèle.

En deuxième étape, les effets d'un scénario alternatif de gestion agricole sur les flux de sédiments du bassin versant ont été projetés avec le support de GÉODEP. Les pratiques culturales anti-érosives et les aménagements des terres modélisés à partir du scénario alternatif de gestion ont été retenus par le Groupe Conseil Agro Bois Francs dans le cadre de son plan triennal d'action concertée dans le bassin versant de la rivière Bulstrode (GCABF, 2019b). La démarche de modélisation du scénario alternatif de gestion consiste à modifier les paramètres de gestion des différents champs en culture (scénario de référence), 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 suivant une ou une combinaison de pratique culturale anti-érosive et l'aménagements des terres. Suivant les perspectives du plan triennal du GCABF (2019b), le scénario alternatif de gestion a retenu deux principaux objectifs, soit :

- La réduction des taux d'érosion des champs en culture. Les pentes modérées des champs, l'indice d'érodabilité élevée des sols et l'importance des cultures annuelles contribuent à la vulnérabilité élevée de certains secteurs du bassin versant du ruisseau Parent. Les régies anti-érosives projetées assurent qu'aucune surface n'est laissée à nu après les récoltes. Des cultures de couverture sont systématiquement implantées dans le soja, le maïs ensilage et les céréales à paille, alors que le déchaumage printanier des champs protège de l'érosion les cultures de maïs qui étaient préalablement labourés à l'automne, dans le scénario de gestion de référence.
- La protection des zones riveraines. Des bandes riveraines élargies de trois mètres de largeur sont implantées dans les champs dédiés à la production de cultures annuelles. L'aménagement de structures de captage et de sédimentation dans tous les fossés affluents du ruisseau complètent l'action concertée sur les rives du cours d'eau.

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 sédiments et de P, afin de projeter leurs ratios coûts : efficacité.

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 d'information géographique à haute résolution (1m) et mis à la disposition des promoteurs du projet. Le système d'information à référence spatiale réalisé dans le cadre 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 associées 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;
- L'analyse et la cartographie des parcours de l'eau à haute résolution (1 m) dans les champs 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 projections des exportations de sédiments représentatives de la situation actuelle du bassin versant du ruisseau Parent (scénario de gestion de référence).
- Les résultats de projections des exportations de sédiments et de P associés à un scénario alternatif de gestion pour le bassin versant du ruisseau Parent.

3.1 Paramétrage du modèle

L'outil de diagnostic spatialisé des exportations de phosphore (GÉODEP) développé par l'IRDA (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 (P) du bassin versant du ruisseau Parent. 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., 2008). Développé dans

une perspective d'appui à la planification d'actions concertées ciblées sur la réduction des exportations de P, l'intérêt de l'outil GÉODEP réside d'abord dans l'identification des zones les plus à risque d'érosion et de pertes de P, puis dans l'opportunité d'évaluer différents scénarios d'intervention sur le devenir des charges de sédiments et de P émises.

Conceptuellement, le méta-modèle exprime les principaux facteurs déterminants des exportations de sédiments et de P, soit en lien avec les apports et les stocks présent de P dans les sols (Facteurs Sources), ou en lien avec les processus de ruissellement et d'érosion (Facteurs Transport). Les facteurs déterminants de l'émission de ruissellement de surface et de l'érosion sont exprimés 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).

Sur le plan de la gestion des données, les différents modules de GÉODEP mettent à profit les banques de données géospatiales publiques disponibles en milieu rural au Québec (données d'élévation, de pédologie, de plans de culture, etc.), de même que des données pertinentes à la région des sols et des cultures des entreprises agricoles, afin de produire des estimations de hauteurs d'eau ruisselées de même que des taux d'exportation de sédiments et de P. 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; 2018a).

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 reliées 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 commun. Les données associées 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.

Pour les fins de la présente étude, les données à référence spatiale suivantes ont été utilisées en support au paramétrage de GÉODEP pour le bassin versant de la rivière Boyer :

- 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 de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec (MERN, 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 (COPERNIC, 2019);
- L'hydrographie surfacique et les cartes de base du MERN (BDTQ) et de Ressources Naturelles Canada (Géobase).

La modélisation hydrologique des scénarios de gestion de référence et alternatifs, de même que l'analyse économique, ont profité d'une cueillette d'informations auprès des entreprises

agricoles du bassin versant de la rivière Bulstrode par l'équipe du Groupe Conseil Agro Bois Francs (GCABF, 2019a, 2019b).

Relief et hydrographie

La délimitation des bassins versants et les sous-bassins versants à haute résolution a été réalisée à partir du MNE LiDAR (figure 2). Les directions et les accumulations des parcours de l'eau ont été colligées et regroupées en sous-bassins dont le seuil minimal de superficie a été fixé à 10 ha de la zone d'étude.

Pédologie

La figure 2c illustre la distribution spatiale des séries de sol du territoire à l'étude. Dans l'ensemble, le loam limoneux de la série Melbourne domine dans le bassin versant. Des informations détaillées sur les sols de la région d'étude sont disponibles dans l'étude pédologique réalisée par Rompré et col. (1984). Chaque polygone de sol de la zone d'étude 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 P. 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.

Occupation des sols

En plus des données colligées par le Groupe Conseil Agro Bois Francs auprès des entreprises agricoles, le scénario de gestion de référence de l'occupation des sols 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, 2018, 2019), de même que les polygones de la carte écoforestière (SIEF) du MERN (2010). Les classes détaillées d'occupation agricole (BDPPAD) et d'occupation non-agricole du territoire (SIEF) ont été regroupées en classes généralisées d'occupation afin de simplifier l'exercice de modélisation hydrologique.

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 MNE LiDAR afin de générer de façon précise les facteurs de longueur et d'inclinaison des parcours de l'eau qui sont mis à contribution dans la prédiction du taux d'érosion (Michaud et al., 2018a).

La démarche est supportée en plusieurs étapes, telles qu'illustrées sur la figure 5. 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).

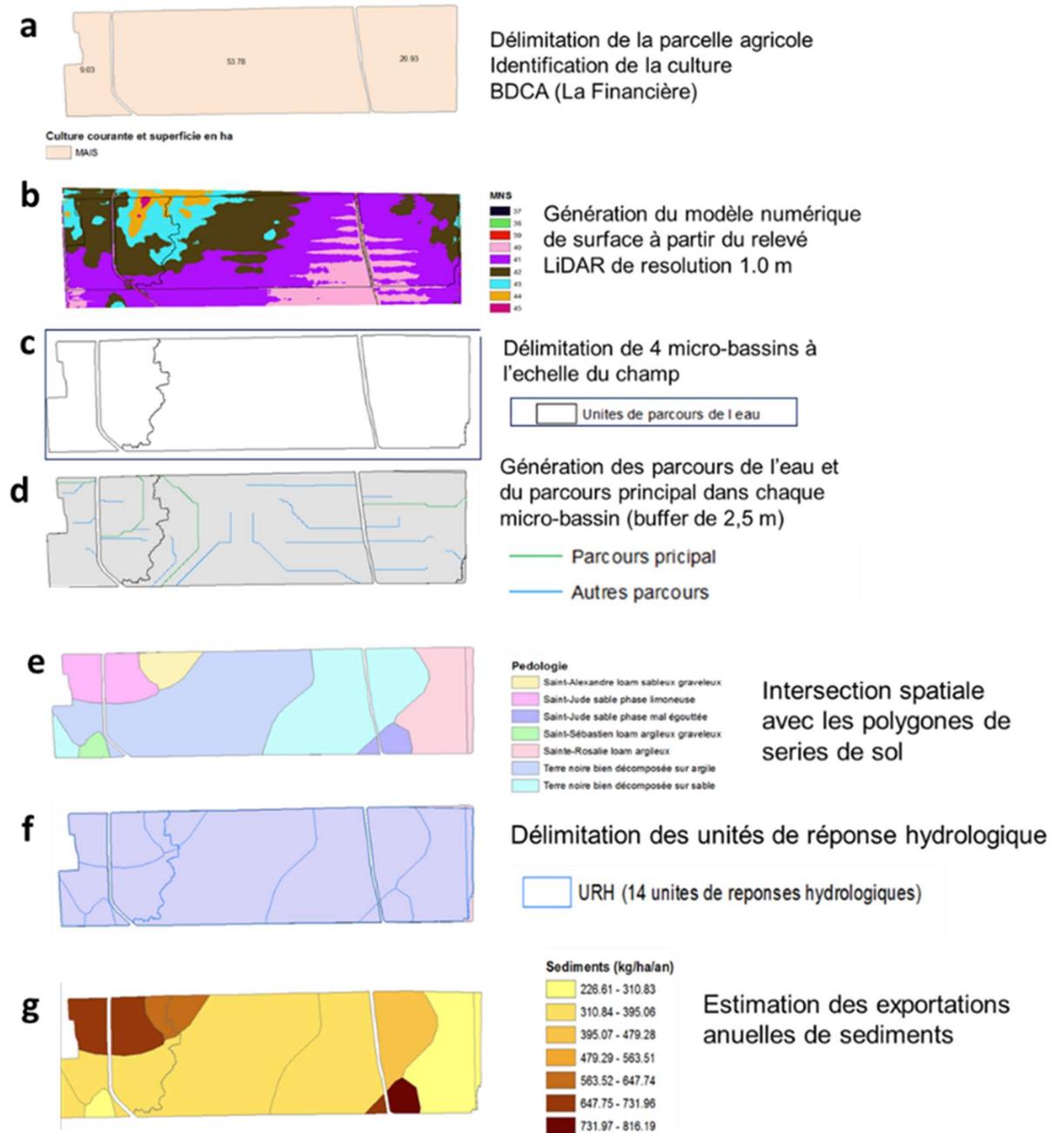


Figure 5. Illustration des différentes étapes de traitement des données à référence spatiale dans GéODEP pour une portion de territoire à vocation agricole.

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, sur le plan spatial, les Unités de Réponse Hydrologique Homogènes (URHH). C'est à l'échelle de ces unités que sont calculées et représentées toutes les sorties de GÉODEP pertinentes à l'indexation du risque de ruissellement, de l'érosion.

Suivant le découpage des unités de réponse hydrologique (URHH), les flux de sédiments sont estimés par GÉODEP à l'échelle des URHH en faisant intervenir la hauteur projetée du ruissellement de surface, l'érodabilité du sol, l'analyse des parcours de l'eau (facteur LS d'inclinaison et de longueur de parcours de l'eau de l'équation modifiée universelle de perte de sol - MUSLE) et un facteur de couverture (C) propre à l'occupation du sol et à la régie des champs (Michaud et al., 2009).

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). 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.

3.2 Scénarios de gestion du parcellaire

L'ODEP et GÉODEP ont été développés principalement afin d'évaluer les risques d'exportations de sédiments et de phosphore (P) en milieu agricole. Les routines de calcul des prédictions du taux de ruissellement, d'érosion et d'exportation de P 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 P 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 gestion de référence.

Pour les fins de la présente étude, deux scénarios de gestion agricole ont été générés en intrants aux simulations des flux de sédiments dans GÉODEP pour le bassin versant du ruisseau Parent:

- 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'implantation généralisée de pratiques culturales de conservation des sols et d'un scénario d'aménagement riverain des terres de l'ensemble du bassin versant.

Scénario de gestion agricole de référence :

La représentation spatiale des cultures du scénario de gestion de référence a été générée sur la base des données de la BDCAG (La Financière, 2019) et la carte écoforestière du MERN (2010), agrégées en classes principales de cultures (céréales à paille, maïs, prairie et soja). Des scénarios de régimes 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 documentation des régimes des sols et des cultures, de même que de l'aménagement des terres du bassin versant de la rivière Parent se sont inspirées des données colligées dans la région d'étude par Groupe Conseil Agro Bois Francs (GCABF, 2019a).

Le tableau 3 présente les classes d'aménagement du drainage des terres retenues pour l'exercice de modélisation hydrologique. Globalement, 30% des terres en culture du bassin ont été considérées drainées, dont les cultures de maïs et de soja. En ce qui a trait aux pratiques de travail du sol, 73% des superficies en maïs ont été considérées labourées à l'automne dans le scénario de référence (tableau 4). Toutes les superficies en culture de soja ont été associées au semis direct alors que le maïs ensilage et les céréales à paille ont été considérées déchaumées au printemps. Au global, les proportions des différents systèmes de travail du sol reflètent le portrait local des pratiques culturelles (GCABF, 2019a).

Dans l'ensemble, les informations suivantes en lien avec la régimes des sols et des cultures ont été documentées pour chacune des 385 unités de calcul du méta-modèle (URHH : unité de réponse hydrologique homogène) 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 P, engrais minéraux en bande et à la volée;
- Taux d'apports de P des épandages d'engrais de ferme (jusqu'à deux épandages);
- Période d'épandage et délai suivant à l'incorporation pour chacun des épandages;
- Classe de travail du sol;
- Classe d'aménagement du drainage souterrain;
- Classe d'aménagement du drainage de surface;
- Classe de condition du profil cultural;
- Classe de largeur de bande riveraine;
- Présence de structures de contrôle du ruissellement et de l'érosion.

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

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

Tableau 3. Distribution des classes de drainage des champs du bassin versant du ruisseau Parent retenue pour la simulation GÉODEP.

Classes de cultures annuelles	Superficie (ha)	(% total)	Drainage systématique (ha)	Absence (ha)
Céréales à paille	45.3	10.7%	1.2	44.1
Maïs ensilage	2.4	0.6%		2.4
Maïs grain	73.1	17.2%	73.1	
Soja	49.6	11.7%	49.6	
Prairie	253.5	59.8%	1.2	252.3
Total	423.9	100%	125.1	298.8
% (cultures annuelles)			77.2%	22.8%

Tableau 4. Distribution des classes de travail du sol des champs du bassin versant du ruisseau Parent retenue pour la simulation GÉODEP.

Classes de cultures	Superficie totale (ha)	Scénario de gestion de référence				Scénario alternatif de gestion			
		Labour Automne (ha)	Déchaumage Automne (ha)	Déchaumage Printemps (ha)	Semis Direct (ha)	Labour Automne (ha)	Déchaumage Automne (ha)	Déchaumage Printemps (ha)	Semis Direct (ha)
Céréales à paille	45.3			40.0				45.3	
Maïs ensilage	2.4			2.0				2.4	
Maïs grain	73.1	53.0	17.0					73.1	
Soja	49.6				45.0				49.6
Prairie	253.5								253.5
Total	423.9	53.0	17.0	42.0	45.0			120.8	303.1

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 gestion de référence. Dans le cadre de la présente étude, le montage du scénario alternatif ciblait une réduction substantielle de la charge de sédiments, de même que l'estimation de leur efficacité économique d'abattement, sans égard au potentiel de rentabilité pour les fermes concernées. Conceptuellement, les résultats de la modélisation du scénario alternatif sont à interpréter comme un niveau maximal de réduction de la charge de sédiments pouvant être atteint suivant l'implantation de ces mesures sur l'ensemble du parcellaire en culture et tronçons de cours d'eau vulnérables.

La sélection des pratiques culturales et des aménagements des terres retenus dans l'exercice de modélisation du scénario alternatif de gestion est inspirée du plan triennal développé par le GCABF (2019b) :

- Sur le plan des pratiques culturales, l'ensemble des superficies en maïs grain labouré ou déchaumé à l'automne passe au déchaumage printanier. Les superficies en soja demeurent sous semi direct, alors que le maïs ensilage et les céréales demeurent en déchaumage au printemps.
- Des cultures de couverture sont établies dans l'ensemble des cultures de céréales à paille, maïs ensilage et soja.
- Des bandes riveraines élargies (3m+) sont établies le long du cours d'eau pour toutes les cultures annuelles.
- Enfin, des fossés-avaloirs sont également installées aux confluences du ruisseau Parent pour toutes les cultures annuelles.

4. Résultats de la simulation hydrologique

La figure 6 illustre les résultats générés par le méta-modèle à l'échelle des 385 unités de calcul du modèle (URHH) pour l'ensemble du bassin versant du ruisseau Parent. Les charges totales de sédiments par classe de culture et pour les autres occupations du sol en scénario de référence sont rapportées au tableau 5. Dans l'ensemble, les projections d'exportation de sédiments du scénario de référence (110 tonnes de sédiments par an) reflètent les résultats du suivi hydrométrique réalisé à l'exutoire du ruisseau Parent pour la période 2017-2020, (119 tonnes par an). La majeure partie des exportations de sédiments est associée à l'occupation agricole du sol (95%). Les superficies en maïs grain labourées à l'automne (53 ha) apparaissent particulièrement vulnérables en raison des sols laissés à nu durant la période la plus active du ruissellement, entre la fin des récoltes et les semis du printemps. Les superficies en production de soja, bien que considérées en semis direct, demeurent aussi vulnérables à l'érosion en raison d'une couverture de résidus de culture peu abondante. L'absence de bandes riveraines exacerbe également l'exportation des sédiments depuis les champs vers le ruisseau.

Tableau 5. Charges annuelles totales et spécifiques (par unité de surface) de sédiments projetés pour les classes d'occupation du sol du bassin versant du ruisseau Parent en scénario de référence.

Classe d'occupation du sol	Superficie		Charge annuelle de sédiments		
	(ha)	(%)	Total (kg)	Spécifique (kg/ha)	(% Total)
Céréales à paille	45.3	8.9%	17 611	389	16.0%
Maïs ensilage	2.4	0.5%	815	339	0.7%
Maïs grain	73.1	14.4%	32 042	438	29.1%
Soya	49.6	9.8%	9 769	197	8.9%
Prairie	253.5	50.0%	44 373	175	40.3%
Total agricole	423.9	83.6%	104 610	247	95.1%
Forêts	22.5	4.4%	258	11	0.2%
Friches	58.3	11.5%	4 737	81	4.3%
Routes non pavées	2.2	0.4%	360	164	0.3%
Routes pavées	0.1	0.0%	9	61	0.0%
Total non agricole	83.2	16.4%	5 364	65	4.9%
Total général	507.0	100.0%	109 974	217	100.0%

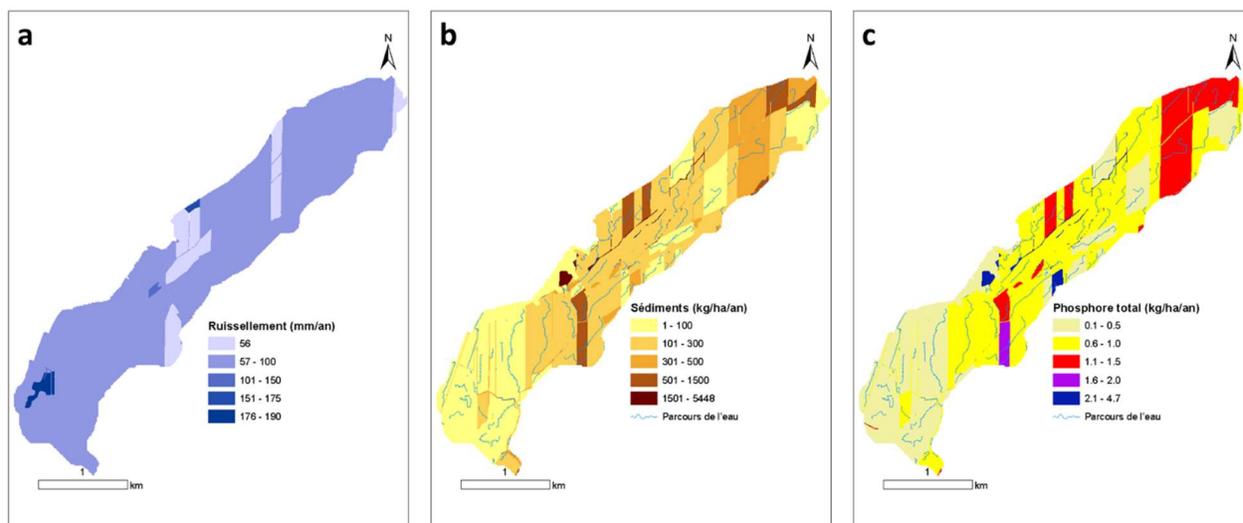


Figure 6. Hauteur de ruissellement (a), charge spécifique de sédiments (b) et de phosphore (c) projetées pour le bassin versant du ruisseau Parent par simulation avec le méta-modèle GÉODEP pour le scénario de gestion agricole de référence.

Tableau 6. Charges annuelles de sédiments projetées pour les superficies en culture du sous-bassin versant du ruisseau Parent suivant le scénario de gestion de référence et le scénario de gestion alternatif ciblé sur la prévention de l'érosion des sols.

Occupation	Superficie (ha)	Charge annuelle de sédiments (Tonnes)	
		Scénario de référence	Scénario alternatif
Céréales à paille	45	17.6	13.0
Maïs ensilage	2	0.8	0.3
Maïs grain	73	32.0	9.2
Soya	50	9.8	4.3
Prairie	254	44.4	32.8
Total agricole	424	104.6	59.6

Une projection des charges annuelles de sédiments du sous-bassin versant du ruisseau Parent suivant le scénario de gestion de référence et le scénario de gestion alternatif est présenté au tableau 6 pour les différentes classes de culture. Une atténuation projetée des flux de sédiments de l'ordre d'environ 45 tonnes découle de l'application du scénario alternatif de gestion des sols du sous-bassin versant inspirée du plan d'action du GCABF (2019), correspondant à un taux d'atténuation de 43% par rapport à la charge projetée pour le scénario de référence. La

conversion du maïs grain à la culture sans labour se traduit en réduction de plus de 21 tonnes de sédiments par an, alors que l'implantation des cultures et l'aménagement riverain (bandes riveraines et fossés-avaloirs) se traduisent respectivement en réductions de 9,8 et 14,0 tonnes de sédiments sur une base annuelle.

Deux mises en garde s'imposent à l'égard des réponses de la qualité de l'eau aux actions agroenvironnementales projetées 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. 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 du ruisseau Parent. Le système d'information développé 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 aux aménagements des terres estimées par le méta-modèle GéODEP, qui doivent aussi être considérées à titre indicatif. Certes, les charges globales de sédiments projetées par GéODEP en scénario de gestion de référence sont représentatives des données de suivi hydrométrique colligées à la station hydrométrique du ruisseau Parent (2027-2020). Cependant, nous ne disposons pas de telles balises (données de suivi hydrométrique) pour valider les projections de taux d'érosion en réponse à des scénarios alternatifs de gestion considérées. 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 cultureux et d'élevage propres au Québec.

5. Analyse coûts : efficacité des pratiques alternatives de gestion

Cette section du rapport commente l'efficacité des pratiques retenues au scénario alternatif de gestion en fonction des coûts liés à leur implantation. 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 permet de projeter et comparer les ratios coûts : efficacité associée à chacune des pratiques de gestion alternative sur une base spécifique, soit en unités de charge de sédiments réduite par unité de superficie en culture (\$/kg de P et \$/kg de MES).

Cultures sur résidus du maïs grain

En scénario de gestion de référence, les superficies présumées labourées en maïs grain totalisent 53 ha. Le déchaumage printanier, en alternative au labour d'automne, se traduit en des réductions projetées de 2.7 T de sédiments par année (tableau 7).

Cette pratique de gestion alternative présente le meilleur ratio coûts : 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, États-Unis), 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 semis 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 8, suivant une conversion et actualisation des données en devises canadiennes (Banque du Canada, 2019). Le travail réduit du sol présente ainsi une baisse de coûts de 40\$/ha, résultant du remplacement du labour (76\$/ha) par le déchaumage (36\$/ha). L'impact des pratiques de conservation sur les rendements a également été considéré dans l'étude, mais celui-ci s'est avéré peu significatif en regard des économies significatives dans les coûts.

Dans le cadre de la présente étude, le travail primaire du sol 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 tasse-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 semis 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. Finalement, 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 une réduction de coûts d'environ 10\$ (tableau 7).

Tableau 7. Analyse coûts : efficacité en termes de réduction des charges de sédiments associée au travail réduit du sol des superficies en maïs grain pour le bassin versant du ruisseau Parent.

Scénario de gestion agricole		Réduction massique de la charge de sédiments (kg)	Coût spécifique de la réduction de la charge de Sédiments (\$/kg)
Culture sur résidus du maïs grain			
Superficie traitée (ha)	53		
Marge sur coûts variables perdue (\$/ha) ¹	-40 \$		
Marges perdues - Total (\$)	-2 120 \$	21 173	-0.10

1: Les montants négatifs indiquent un bénéfice plutôt qu'un coût.

Tableau 8. Différences dans les coûts de production associées à la conversion de la pratique culturale de labour vers le travail réduit du sol et le semis 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

Cultures de couverture

Si le déchaumage de printemps s'avère efficace en production de maïs grain et de céréales à paille dans la prévention de l'érosion, les cultures de soja et de maïs ensilage demeurent vulnérables en absence de travail du sol en raison du faible couvert de résidus. Aussi, l'ensemble des superficies en culture de soja (50 ha), de maïs ensilage (2 ha) et de céréales à paille (45 ha) s'est vu attribuer une culture de couverture. Le tableau 9 présente les superficies traitées et les projections des efficacités respectives des différents scénarios d'interculture à réduire les charges de sédiments et de P aux cours d'eau.

Pour le soja, l'introduction de la culture de blé panifiable d'automne dans la rotation peut faire office de culture de couverture. Le semis à la volée, précédent la tombée du feuillage du soja, est ici envisagé pour l'implantation de la culture de blé. Le coût de la mesure est estimé sur la base du remplacement du maïs grain ou du soja dans la rotation par une année de culture de blé d'automne. La marge sur coûts variables associée au blé d'automne (793 \$/ha; CRAAQ, 2018b)

est en effet 99\$/ha inférieur à la moyenne des marges dégagées par du maïs grain (992\$/ha) et du soja (792\$/ha). Pour le maïs ensilage, le coût d'implantation intercalaire du ray-grass est estimé à 76\$/ha (CRAAQ, 2016).

La culture associée de trèfle rouge dans les céréales à paille (43\$/ha), de même que la culture intercalaire de raygrass dans le maïs grain (76\$/ha) ont également été considérées dans le scénario alternatif en raison des bénéfices anticipés sur la condition physique des sols. L'efficacité anti-érosive de ces scénarios demeure cependant marginale compte tenu de la protection efficace déjà apportée par les résidus de culture.

Au total, la réduction annuelle projetée de la charge de sédiments par le méta-modèle, associée à l'implantation des cultures de couverture, est de l'ordre de 9.8 T de sédiments par rapport au scénario de gestion de référence (tableau 9). Il est ici postulé qu'aucun apport d'engrais de ferme ne serait appliqué sur la culture de couverture suivant la récolte des cultures annuelles, 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 toute la pertinence d'incorporer les engrais de ferme afin de prévenir l'enrichissement du ruissellement de surface en P.

Tableau 9. Analyse coûts : efficacité en termes de réduction des charges de sédiments et de phosphore (P) associée aux cultures de couverture implantées dans les superficies en soja pour le bassin versant du ruisseau Parent.

Scénario de gestion agricole	Céréales à paille ¹	Maïs ensilage ²	Soja ³	Total	Réduction massique de la charge de sédiments (kg)	Coût spécifique de la réduction de la charge de Sédiments (\$/kg)
Cultures de couverture dans les cultures annuelles						
Superficie traitée (ha)	45	2	50	97		
Marge sur coûts variables perdue	43 \$	76 \$	99 \$			
Marges perdues - Total (\$)	1 935 \$	152 \$	4 950 \$	7 037 \$	9 843	0.71 \$

1: Trèfle rouge semé en intercalaire lors du semis des céréales. Semences et inoculant: 30\$/ha; Opérations: 13\$/ha (CRAAQ, 2016).

2: Ray-gras annuel semé en intercalaire en post-levée du maïs ensilage. Semences et inoculant: 55\$/ha; Opérations: 21\$/ha (CRAAQ, 2016).

3: Blé panifiable d'automne. Marge sur coûts variables de 793 \$ (CRAAQ, 2018b) en baisse de 99\$ vs moyenne du maïs grain (992\$) et soja (792\$).

Implantation de bandes riveraines élargies et de bassins de captage sur les superficies en cultures annuelles

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 au 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 P 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 P dissous.

Tel que rapporté au tableau 10, l'aménagement de 170 ha en cultures annuelles impliquerait 692 m de bandes riveraines et 23 structures de captage. La réduction projetée dans les exportations de sédiments est de l'ordre de 14 T de sédiments.

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).

Un coût d'opportunité a également été estimée pour les superficies en culture annuelle converties en bande riveraine, sur la base des marges sur coûts variables perdues. Celles-ci varient de 188\$/ha pour une céréale à paille de printemps, 581\$ pour le maïs ensilage, 996\$/ha pour le maïs grain et 792\$/ha pour le soja (tableau 10). À 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 global, les frais d'aménagement de la bande riveraine élargie et des fossés-avaloirs pour les superficies en cultures annuelles, de même que les frais d'entretien et de compensation sur cinq ans totalisent 34,184 \$ (6,837 \$ rapporté annuellement). Pour une implantation à l'ensemble des superficies en culture, incluant les prairies, le coût total d'implantation atteint 77,207\$ (tableau 10).

Tableau 10. Analyse coûts : efficacité en termes de réduction des charges de sédiments associée à l'aménagement de bandes riveraines élargies et de structures de captage et de sédimentation des superficies en culture annuelles du bassin versant du ruisseau Parent.

Occupation du territoire	Long. de rives (m) ¹	Superf. ciblées (ha)	Superf. en bande river. élargie - 3 m (ha) ¹	Marge sur coûts var. perdue (\$/ha) ²	Marges totales perdues (\$)	Nb Ouvrages ³	Coût des ouvrages (\$) ⁴	Coût d'implantation de la bande riveraine (\$) ⁵	Coût total de l'aménagement (année 1) (\$) ⁶	Coût d'entretien total sur quatre ans (\$) ⁷	Coût total (Marges, implantation et entretien) 5 années (\$)	Coût total annuel (\$)	Réduction massive de la charge de sédiments (kg)	Coût spécifique annualisé de la réduction de la charge de sédiments (\$/kg P)
Céréales	184	45	0.055	188	10	6	7 327	1 142	8 479	202	8 723	1 745		
Maïs ensilage	10	2	0.003	581	2	1	1 213	61	1 275	11	1 293	259		
Maïs grain	297	73	0.089	996	89	10	11 823	1 843	13 754	326	14 436	2 887		
Soja	201	50	0.060	792	48	7	8 022	1 251	9 320	222	9 733	1 947		
Prairie	254	254	0.076	436	33	34	40 999	1 577	42 610	279	43 022	8 604		
Total- Cultures annuelles	692	170	0.208	2 557	149	23	28 384	4 296	32 829	761	34 184	6 837	13 984	0.49 \$
Total en culture	1 721	424	0.284	2 993	182	57	69 384	5 874	75 439	1 040	77 207	15 441		

1: Ratio moyen de 4.06 m de rive par ha en culture annuelle (Michaud et col., 2019), excluant les cours d'eau et rives du corridor d'inondabilité.

2: Céréales, maïs grain et soja: Belzile, 2019; Prairie: CRAAQ, 2018a; Maïs ensilage: CRAAQ, 2019; Marîcher (Maïs sucré): Craaq 2011; Petits fruits (framboises): CRAAQ, 2007.

3: Superficie drainée de 7,5 ha par structure, adapté de Lauzier (2009).

4: Coût moyen par aménagement de 1,213\$/structure. Adapté de Lauzier (2009), coûts actualisés pour l'année 2019.

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).

Synthèse des coûts et efficacités

Une synthèse des coûts et des efficacités de réduction des charges de sédiments pour les scénarios cumulés de mesures agroenvironnementales appliqués à l'ensemble du bassin versant du ruisseau Parent est présentée au tableau 11. L'ensemble des superficies où les pratiques étaient applicables sont alors mises à contribution, ce qui implique, en théorie, 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 mise en relief. Les coûts spécifiques projetés de la réduction des charges de sédiments et de P passent en effet d'un coût nul (bénéfice net) pour la conversion à la culture sur résidus, à 0.66\$/kg de sédiments pour l'aménagement riverain.

Tableau 11. Synthèse de l'analyse des coûts et des efficacités, en termes de réduction des charges de phosphore (P) et de sédiments, des scénarios cumulés de mesures agroenvironnementales appliqués à l'ensemble du bassin versant du ruisseau Parent.

Scénario de gestion agricole	Superficie Traitée (ha)	Réduction massique de la charge (kg)	Taux spécifique de réduction de la charge (kg/ha)	Coût spécifique de la réduction de la charge (\$/kg)	Coût total annuel de la réduction de la charge (\$)
Culture sur résidus du maïs grain ²	53	21 173	399	-0.09 \$	-1 906 \$
Cultures de couverture dans les cultures annuelles vulnérables	97	9 843	101	0.66 \$	6 497 \$
Bandes riveraines élargies et structures de captage et de sédimentation (Cultures annuelles) ²	170	13 984	304	0.45 \$	6 293 \$
Total	320	45 000	141	0.24 \$	10 884 \$

1: Les montants négatifs indiquent un bénéfice plutôt qu'un coût.
2: Coût annualisé sur cinq ans (Implantation et entretien).

Rappelons que ces ratios expriment le coût d'implantation de la pratique par rapport à son efficacité moyenne à réduire les charges de sédiments pour l'ensemble des champs où elle a été appliquée, considérant l'effet cumulée des différentes mesures. Tel que commenté antérieurement, le relief et les systèmes culturaux du bassin versant du ruisseau Parent induisent une variabilité spatiale dans les charges projetées de sédiments et de P. Les quantités de sédiments 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 variabilité dans l'efficacité (coût spécifique de la réduction de la charge de sédiments ou de P) d'une

pratique donnée. Une implication pratique de cette variabilité est tout l'intérêt de cibler les champs les plus vulnérables dans l'introduction des pratiques culturales de conservation et d'aménagement des terres.

En complément des réductions de charges de sédiments, il est important de noter que les bénéfices liés à l'amélioration de la condition physique des sols, la contribution en azote des engrais verts (réduction du coût de la fertilisation) et les gains de productivité des cultures découlant de l'application des pratiques culturales alternatives ne sont pas pris en compte dans la présente analyse coûts : efficacité. (ACE). Il faut garder à l'esprit la finalité de ce type d'analyse, telle que réalisée dans le cadre de l'étude de cas du bassin versant du ruisseau Parent. 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 vers l'option la moins coûteuse pour obtenir un résultat voulu, la réduction des flux de sédiments 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 une réduction substantielle de la charge en sédiments à la rivière. 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 sédiments et en P (réduction des coûts de traitement de l'eau potable, hausse des revenus des usages récréatifs des plans d'eau, baisse des coûts d'entretien des cours d'eau, etc.). Par ailleurs, le lecteur doit garder à l'esprit que les résultats de l'ACE sont surtout à considérer 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.

Rappelons en terminant que la combinaison des pratiques retenues dans le cadre du présent scénario alternatif de gestion, inspiré du plan triennal de du GCABF (2019), peut être modulée au gré de l'utilisateur du méta-modèle. Dans les faits, une multitude de scénarios de régulation des sols et d'aménagement des terres peut être générée, générant des réductions tout aussi tangibles des exportations de sédiments et de phosphore à la rivière. En ce sens, le système d'information géographique et l'application de GÉODEP réalisés dans le cadre de ce projet se présente comme un outil de première ligne pour les conseillers agricoles dans l'accompagnement des entreprises agricoles du bassin versant du ruisseau Parent vers la planification d'actions agroenvironnementales efficaces et adaptées sur mesure aux systèmes de production des entreprises.

6. 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., Grenier, M., Giroux, M., Girard, V. 2009. Base de données sur les statistiques des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec.

Belzile, 2019. Communications personnelles.

CRAAQ, 2016. Engrais verts semés à la dérobé et en intercalaire, Coûts d'implantation. Références économiques. AGDEX 537/821b.

CRAAQ. 2018a. Foin. Analyse comparative provinciale 2016, analyse de données AGRITEL. Références économiques, CRAAQ, Agdex 120/891.

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.

Deslandes, J., Beaudin, I., Michaud, A. R., Bonn, F., Madramootoo, C. A. 2007. 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.

Drouin, A., Beaudin, I., Michaud, A. 2014. GÉODEP : l'outil de diagnostic des exportations de P spatialisé. Fiche synthèse, IRDA. 2 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/publications/GeODEP-l-outil-de-diagnostic-des-exportations-de-P-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/>

Groupe Conseil Agro Bois Francs (GCABF, 2019a). Compilation des PAA. Projet du bassin versant de la rivière Bulstrode en amont du réservoir Beaudet.

Groupe Conseil Agro Bois Francs (GCABF, 2019a). Présentation du plan triennal. Projet du bassin versant de la rivière Bulstrode en amont du réservoir Beaudet.

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.

IRDA. 2020. Site Web. Diffusion/Publications.

<https://www.irda.qc.ca/fr/publications/?Employeeld=80&TypePubId=&LangId=>

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/>

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 p.

Michaud, A.R., Lauzier, R., et M. R.Laverdière. 2005. Mobilité du P 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.

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 P. Manuel de l'utilisateur. 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.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 p. Rapport de recherche •

Michaud, A.R. et W. Huertas. 2019. Suivi hydrométrique du bassin versant de la rivière Bulstrode. Rapport technique intérimaire. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), COPERNIC. 35 pages.

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 p. Rapport de recherche •

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.

Wall, G.J., D.R. Coote, E.A. Pringle et I.J. Shelton (editors). 2002. RUSLEFAC — Revised Universal Soil Loss Equation for Application in Canada: A Handbook for Estimating Soil Loss from Water Erosion in Canada. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa. Contribution No.

AAFC/AAC2244E. 117 pp. Walker, W. 1998. Flux, Stream loads computations, version 5.0. Environmental laboratory USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi, USA.

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

7. Annexe I: Données utilisées en intrants dans la création de scénarios de gestion dans GÉODEP

Données	Description
Culture	Type de culture : céréales (CER), soja (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
Bande riveraine	Présence et largeur de la bande riveraine : ne s'applique pas (1), moins d'un mètre (2), d'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)