

## RAPPORT FINAL

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



29 JUIN 2020

## PARTENAIRES DE RÉALISATION

**irda**  
INSTITUT DE RECHERCHE  
ET DE DÉVELOPPEMENT  
EN AGROENVIRONNEMENT

**COPERNIC**  
organisme de COncertation Pour l'Eau  
des bassins versants de la Rivière Nicolet  
[www.copernicinfo.qc.ca](http://www.copernicinfo.qc.ca)

## ÉTUDE DE CAS DU BASSIN VERSANT DU RUISSEAU GOBEIL, 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

### 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 GOBEIL, AFFLUENT DE LA RIVIÈRE BULSTRODE. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), COPERNIC. 26 pages plus annexe.

## Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Description du site d'étude .....	5
3. Méthode de modélisation hydrologique.....	11
3.1 Description du modèle .....	11
3.2 Paramétrage du modèle.....	12
4. Résultats de la modélisation GéODEP pour le scénario de référence .....	16
5. Résultats de la modélisation GéODEP pour le scénario alternatif de gestion .....	20
6. RÉFÉRENCES CITÉES.....	24
7. Annexe 1. Séries chronologiques comparées des débits et flux de sédiments des bassins versants affluents de la rivière Bulstrode (échelle commune). .....	26

## Liste des tableaux

Tableau 1. 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.....	11
Tableau 2. Propriétés des séries de sol dominantes du bassin versant du ruisseau Gobeil.....	13
Tableau 3. Hauteur de ruissellement et charges de sédiments totales et spécifiques projetées pour le scénario de référence pour chaque classe d'occupation du sol du bassin versant du ruisseau Gobeil.....	16

## Liste des figures

Figure 1 Localisation du sous-bassin versant du ruisseau Gobeil et de l'ensemble des stations hydrométriques du réseau d'étude de la rivière Bulstrode. ....	6
Figure 2. Séries de sol dominantes (a), modèle numérique d'élévation (b) et occupation du sol (c) du bassin versant du ruisseau Gobeil. ....	7
Figure 3. Station hydrométrique du ruisseau Gobeil. ....	8
Figure 4. Précipitations, lames d'eau et flux journaliers de sédiments estimés à la station Gobeil (Michaud et Huertas, 2020). ....	9
Figure 5. Routes non pavées de forte inclinaison (a et b) et chemins forestiers aménagés (c et d) dans le bassin versant du ruisseau Gobeil, 18 octobre 2019. ....	10
Figure 6. Charges spécifiques de sédiments projetées pour le scénario de référence pour chaque classe d'occupation du sol du bassin versant du ruisseau Gobeil. ....	17
Figure 7. Charge annuelle cumulée de sédiments projetée par classe d'occupation du sol en fonction de leurs superficies respectives. ....	19
Figure 8. Dispersion des longueurs et des inclinaisons moyennes des principaux parcours de l'eau des routes non pavées et des chemins forestiers du bassin versant du ruisseau Gobeil (a) et projection de leurs taux d'exportation de sédiments en fonction du facteur topographique de vulnérabilité à l'érosion (Facteur LS). ....	19
Figure 9. Charges cumulées de sédiments des tronçons de chemins forestiers et de routes non pavées du bassin versant du ruisseau Gobeil suivant le scénario de référence et trois scénarios alternatifs de gestion du réseau de voirie. ....	21

## **1. Introduction**

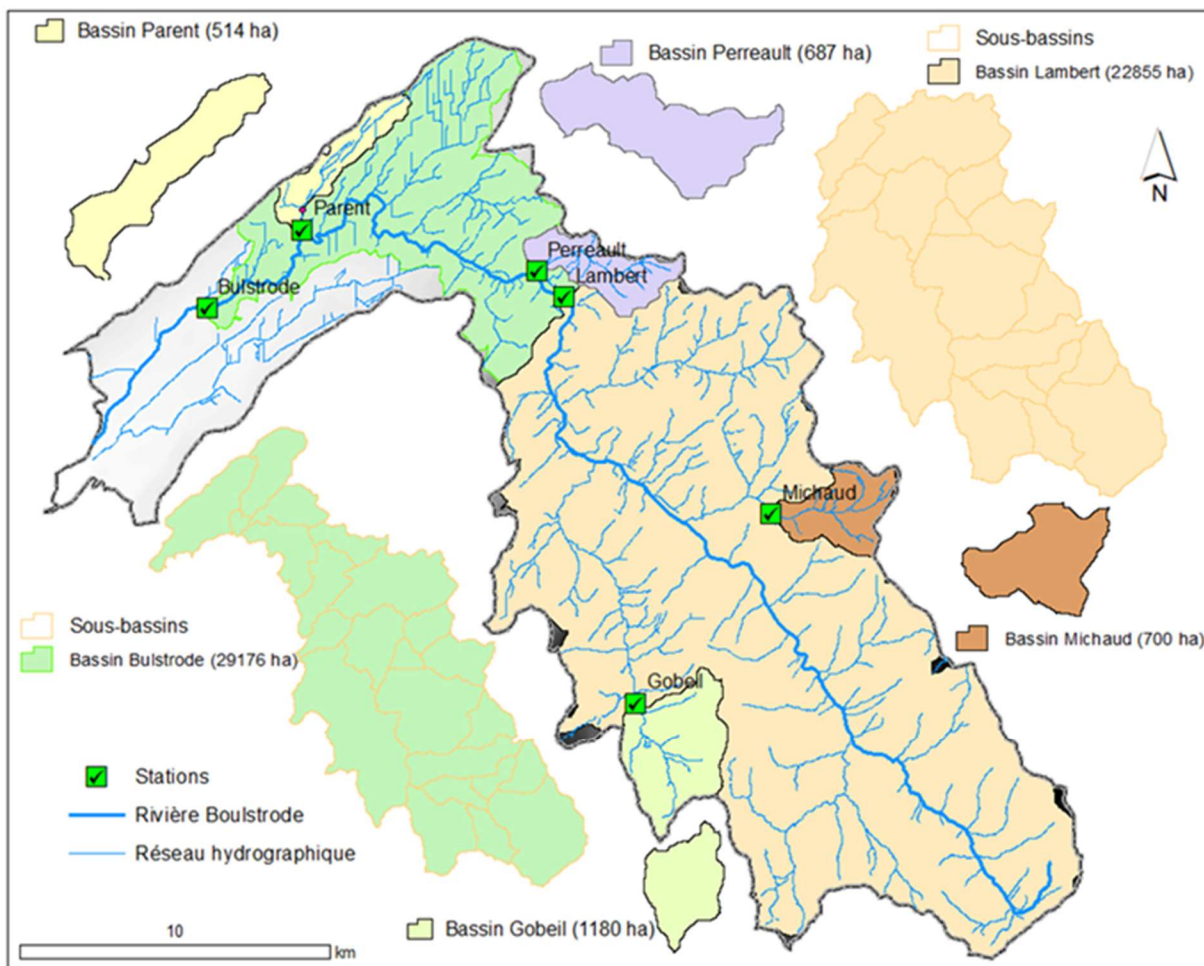
Le réservoir Beudet, situé en bordure de Victoriaville, constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable pour cette municipalité. Ce réservoir a été créé en 1977 par un élargissement de la rivière Bulstrode. L'ensablement graduel du réservoir a mené à une réduction significative de sa capacité. Par conséquent, la Ville de Victoriaville souhaite procéder à une restauration du réservoir, qui inclura notamment l'excavation des 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 Beudet. Dans ce mandat, l'IRDA est responsable des volets d'hydrométrie (monitorage des débits et flux de sédiments en rivière) et des études de modélisation hydrologique (sous-bassin agricole du ruisseau Parent, sous-bassin forestier du ruisseau Gobeil et projection des flux de sédiments en climat futur à l'échelle du bassin versant de la rivière Bulstrode).

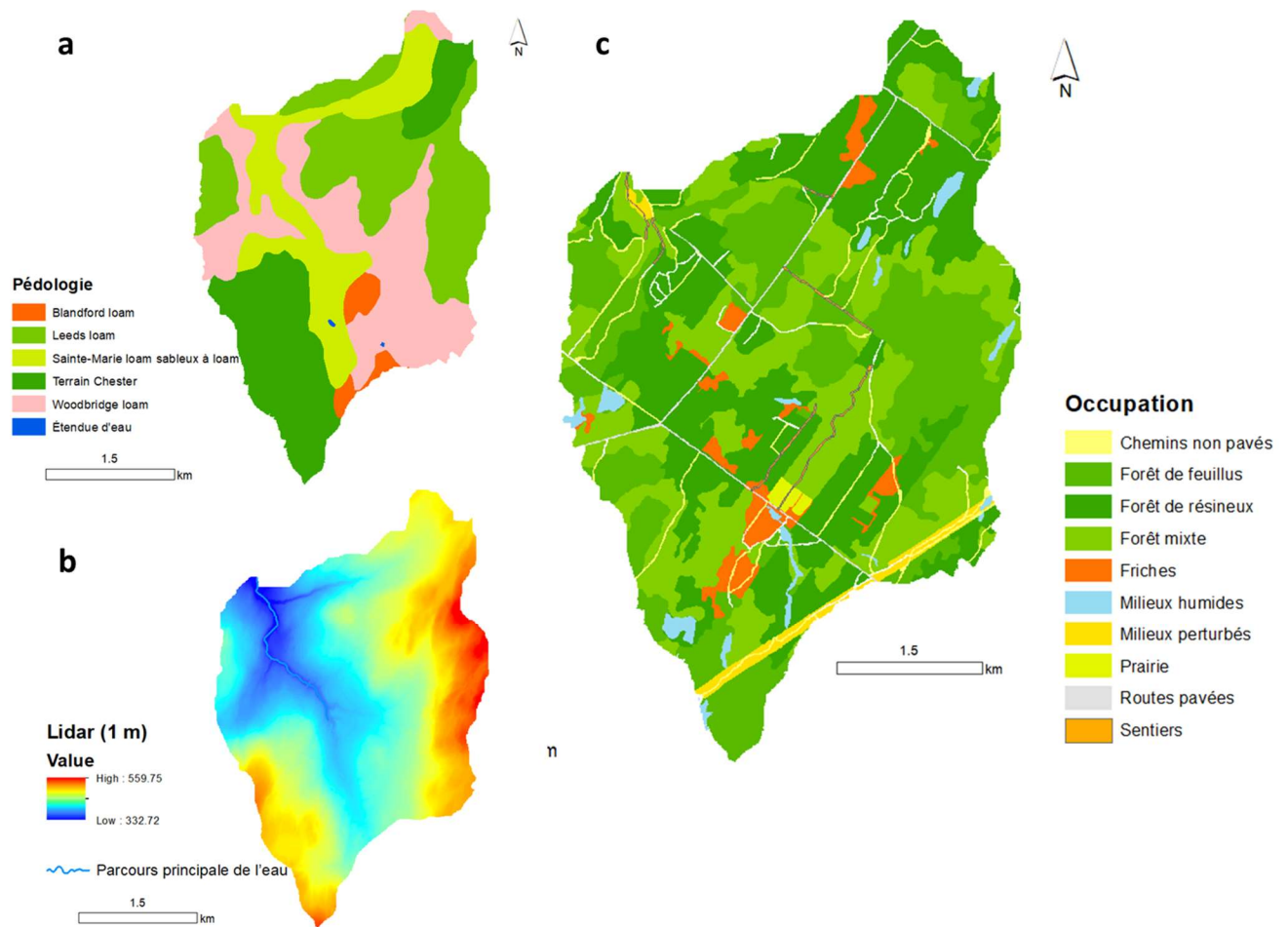
Le volet d'étude hydrologique du sous-bassin forestier du ruisseau Gobeil a pour principal objectif de projeter l'atténuation des flux de sédiments, en réponse à des actions ciblées sur la prévention de l'érosion. Ce document présente les résultats obtenus, suivant une approche de modélisation à haute résolution spatiale (1m) des flux de sédiments pour l'ensemble du bassin à l'étude. Les exportations projetées en situation actuelle sont comparées à celles découlant de scénarios d'aménagement des routes et des chemins forestiers petit bassin versant.

## **2. Description du site d'étude**

Le bassin versant du ruisseau Gobeil est localisé dans le secteur amont du bassin versant de la rivière agricole. La figure 1 illustre la localisation du bassin versant du ruisseau Gobeil et sa station hydrométrique, de même que l'ensemble des stations hydrométriques du réseau d'étude de la rivière Bulstrode. La forêt domine l'occupation du territoire (90%), traversée par un ensemble de routes non pavées et de chemins forestiers. La figure 2 illustre le relief, la pédologie et l'occupation des sols du bassin versant. Sur le plan physiographique, l'ensemble du bassin versant constitue une vallée à caractère glaciaire qui entaille profondément le massif des hautes collines environnantes, appartenant à la région physiographique du plateau appalachien. Ce secteur est formé d'un till dont la texture varie du loam sableux au loam, incorporant du quartz, du schiste, de l'ardoise et du grès reflétant les formations géologiques environnantes.



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



**Figure 2. Séries de sol dominantes (a), modèle numérique d'élévation (b) et occupation du sol (c) du bassin versant du ruisseau Gobeil.**

Le suivi hydrométrique réalisé à la station du ruisseau Gobeil (figure 3) par l'équipe scientifique de l'IRDA a permis de documenter en continu l'évolution des débits et des flux de sédiments depuis novembre 2017 à avril 2020. Les résultats témoignent de charges de sédiments relativement plus faibles, de l'ordre de 96 tonnes de matières en suspension par année (81 kg/ha-an sur une base spécifique) comparées à celles observées aux cinq autres stations du réseau d'étude.

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 Gobeil 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 a générée une lame de ruissellement et une charge de sédiments très importante.



**Figure 3. Station hydrométrique du ruisseau Gobeil.**

Rapportée sur une base annuelle, l'exportation de sédiments (matières en suspension (MES) du ruisseau Gobeil est de l'ordre de 96 tonnes métriques pour la période d'étude. Répartie à l'échelle du bassin versant, cette exportation de sédiments correspond à une charge spécifique de 81 kg/ha par an. Ce taux d'exportation de sédiments demeure relativement moins élevé que pour les autres bassins affluents de la rivière Bulstrode, qui se situent plutôt dans l'ordre de 127 kg/ha-an (ruisseau Perreault) à 233 kg/ha-an au ruisseau Parent (tableau 2). Une occupation du sol dominée par la forêt et des débits de pointe relativement moins élevés que pour les autres ruisseaux affluents à l'étude expliquent ces charges de sédiments de moindre intensité. Si les exportations de sédiments en suspension du ruisseau Gobeil apparaissent relativement peu élevées à l'échelle du bassin versant de la rivière Bulstrode, il demeure cependant difficile de



qualifier ces taux par rapport à d'autres bassins versants sous occupation exclusivement forestière. Il n'y aurait en effet pas d'estimations rigoureuses de charges de sédiments réalisées en bassins versants forestiers au Québec (Jutras, 2019). Les observations colligées dans le cadre de la présente étude constitueraient ainsi une première balise au Québec pour un bassin forestier appalachien. Le coefficient d'exportation de MES mesuré au ruisseau Gobeil (81 kg/ha) demeure le plus faible parmi plus d'une vingtaine de micro-bassins versants en milieu rural de superficies comparables monitorés par l'équipe de l'IRDA. Les taux historiques les plus faibles du réseau d'étude sont associés au micro-bassin de la rivière Tomifobia en Estrie. Les charges annuelles de MES mesurées, de l'ordre de 91 à 141 kg/ha (Michaud et col., 2017), y reflètent une occupation forestière du territoire (55%), de même qu'un paysage et des propriétés de sols apparentés au plateau appalachien.

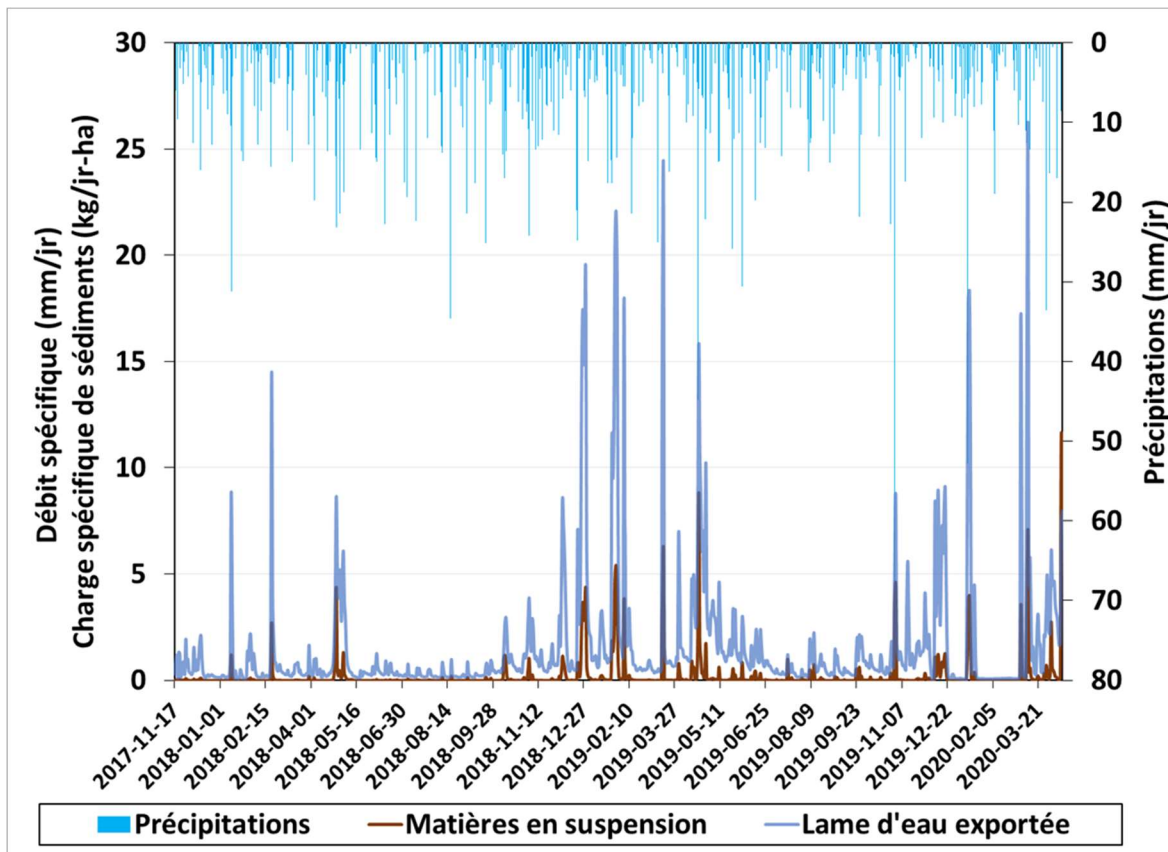


Figure 4. Précipitations, lames d'eau et flux journaliers de sédiments estimés à la station Gobeil (Michaud et Huertas, 2020).

En soi, les résultats de monitoring du ruisseau Gobeil confirme l'hypothèse généralement admise dans la littérature scientifique que l'occupation forestière exerce une pression relativement plus faible sur l'érosion des sols que les occupations agricoles et urbaines du territoire. Les consultations auprès des intervenants professionnels du milieu forestier et de la recherche réalisées dans le cadre de la présente étude indiquent par ailleurs que les principales sources de sédiments sont associées à la voirie plutôt qu'aux aires de coupe (Jutras, 2019; COPERNIC, 2020). Bien que nous ne disposions pas de données précises sur l'ampleur des activités forestières privées dans le secteur d'étude, une reconnaissance sommaire des activités forestières à l'automne 2019 dans le bassin versant du ruisseau Gobeil témoigne de la présence d'un nombre limité de chantiers forestiers. Nos observations ont néanmoins permis de constater la présence de foyers ponctuels d'émissions de sédiments associés à l'aménagement automnal de chemins forestiers (figure 5). Ces derniers expliqueraient les pics de charges de sédiments relativement élevés à la station hydrométrique du ruisseau Gobeil au printemps suivant (fin mars 2020) malgré un ruissellement printanier nettement moins intense qu'en 2018 et 2019 (figure 4). À l'opposé, aux autres stations affluents du réseau (Michaud, Parent et Perreault), les flux printaniers de 2020 se démarquent plutôt à la baisse par rapport aux ruissellements printaniers de 2018 et 2019 (annexe 1).



**Figure 5. Routes non pavées de forte inclinaison (a et b) et chemins forestiers aménagés (c et d) dans le bassin versant du ruisseau Gobeil, 18 octobre 2019.**

**Tableau 1. 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 dans celles des taux d'exportation de sédiments pour l'ensemble du bassin versant du ruisseau Gobeil. Suivant la démarche de modélisation retenue, la réduction de la charge de sédiments au ruisseau par des mesures anti-érosives est projetée en comparant les résultats du modèle pour le scénario de référence, qui sont représentatifs de la situation actuelle, avec les résultats obtenus pour le scénario alternatif de gestion.

L'ensemble des données à référence spatiale utilisé en support à la modélisation a été intégré dans un système d'information géographique à haute résolution (1m) et mis à la disposition des promoteurs du projet.

#### 3.1 Description du modèle

L'outil de diagnostic des exportations de phosphore spatialisé (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 Gobeil. GéODEP consiste en une version spatialisée de l'ODEP (Outil de diagnostic des exportations de phosphore) réalisé 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). L'outil a été développé dans le but d'appuyer la planification d'actions concertées en milieu agricole ciblées principalement sur la réduction des exportations de P en bassins versants agricoles. 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 des émissions de P.

Conceptuellement, le méta-modèle exprime les principaux éléments déterminants de l'érosion et des pertes de P, soit en lien avec les apports et les stocks présents de P dans les sols (facteur source) ou en lien avec les processus de ruissellement et d'érosion (facteur transport). Les facteurs déterminants de l'émission du 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 de culture 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 régie des sols et des cultures des entreprises agricoles, afin de produire des estimations de hauteurs d'eau ruisselées ainsi 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; 2018).

### **3.2 Paramétrage du modèle**

La représentation du risque d'exportation de sédiments et de nutriments réalisée avec le support de GÉODEP est fondée sur l'intégration de deux ensembles d'informations, soit celui relié aux propriétés des sols et des paysages (données géophysiques), de même que celui 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. 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 le bassin versant du ruisseau Gobeil :

- Les polygones de la carte écoforestière du ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec (MERN, 2013);
- 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), incluant le réseau de routes pavées et non pavées, de même que les chemins carrossables et non carrossables.;

### **Relief et hydrographie**

La délimitation des bassins versants et des sous-bassins versants à haute résolution ont été réalisées à partir du MNE LiDAR (CGQ, 2018). 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 nature montagneuse du relief fait en sorte que la profondeur et le drainage du sol est très variable. Le terrain passe ainsi d'une profondeur de quelques centimètres à plusieurs mètres, alors que le drainage passe de bon à très mauvais. Rompré et al. (1984) ont décrit ces sols de till (> 50 cm de profond) suivant le gradient croissant de la qualité du drainage (catena) incluant les séries Leeds, Blandford, Woodbridge, Sainte-Marie et Brampton. Le terrain Chester (sol inférieur à 50 cm de profondeur) désigne pour sa part les sols minces et les affleurements rocheux dérivés des mêmes tills. L'ensemble des sols présentent par ailleurs une forte érodabilité naturelle en raison d'une granulométrie dominée par les particules de limon et de sable très fin. Conjuguée aux fortes pentes du secteur d'étude, cette nature érodable du sol se traduit en vulnérabilité aux processus d'érosion lorsqu'il est laissé à nu et exposé au ruissellement de surface.

**Tableau 2. Propriétés des séries de sol dominantes du bassin versant du ruisseau Gobeil.**

Série de sol	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Sable très fin (%)	Matière organique (%)	Classe de perméabilité	Classe de structure	Groupe hydrologique	Teneur en P naturel	Indice d'érodabilité
<b>Loam Woodbridge</b>	12	45	43	8.3	10.4	5	2	C	781	0.0405
<b>Loam sableux à loam Sainte-Marie</b>	10	29	62	12.2	5.0	5	2	C	756	0.0325
<b>Loam Blandford</b>	14	40	46	10.3	12.5	4	2	B	634	0.0342
<b>Terrain Chester (Affleurements rocheux)</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	D	ND	0.0020

La figure 2 illustre la distribution spatiale des séries de sol du territoire à l'étude. Les propriétés de chaque série de sol, telles que documentées dans la banque de données hydro-pédologiques de l'IRDA (2019) ont été mises à profit dans les modules de calcul du ruissellement de surface et du taux d'érosion, incluant la texture de surface (proportion de sable, de limon et d'argile), la classe de perméabilité, la classe de structure, le taux de matière organique, le groupe



hydrologique et l'indice d'érodabilité du sol. Le tableau 3 présente les principales propriétés des séries de sol du bassin versant du ruisseau Gobeil.

### **Occupation des sols**

Le scénario de gestion de référence de l'occupation des sols (figure 2) a mis à profit les polygones de la carte écoforestière (SIEF) du MERN (2013). Les classes détaillées d'occupation du territoire ont été généralisées selon les catégories suivantes : forêt (feuillus, résineux et mixte), milieux perturbés, friche, prairie et milieux humides. Les réseaux de chemins et de routes forestières ont été mis en forme de polygones de façon à documenter leurs propriétés de sol et de relief et ainsi générer des projections de ruissellement de surface et d'érosion bien discriminées sur le plan spatial.

### **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 de chaque parcelle de territoire qui seront mis à contribution dans la prédiction du taux d'érosion.

La démarche est supportée en plusieurs étapes. 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 chemins et du réseau de routes publiques et forestières). En second lieu, une analyse spatiale est effectuée dans chacun des polygones produits afin d'identifier le parcours de l'eau le plus long à partir duquel, sont calculés les longueurs et les inclinaisons des pentes. 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 ensuite 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 surface et de l'érosion.

### **Scénarios de gestion de référence et alternatif**

Suivant la démarche de modélisation retenue, la réduction de la charge de sédiments au ruisseau par des mesures anti-érosives est projetée en comparant les résultats du modèle entre les scénarios de référence et alternatif :

- Un premier paramétrage du méta-modèle, nommé « Scénario de référence », est représentatif de la situation actuelle dans le bassin versant. Il reflète les flux de sédiments mesurés à l'exutoire au cours de la période 2017-2020.
- Un « Scénario alternatif de gestion » est généré par la suite. Les paramétrages des propriétés des sols, du relief et de l'occupation du territoire du scénario de référence sont alors conservés, mais les émissions de sédiments tiennent maintenant compte de mesures anti-érosives appliquées au réseau de routes et de chemins (non pavés).

L'étude de cas du ruisseau Gobeil constitue une première application de l'outil GÉODEP à un milieu totalement sous occupation forestière. Rappelons que GÉODEP a été développé à l'origine pour évaluer les risques d'exportations de sédiments et de phosphore en milieu agricole. Afin de mieux adapter le méta-modèle aux enjeux de l'occupation forestière, de nouveaux paramètres de couverture du sol (facteurs « C » de l'équation universelle de perte de sol) ont été développés et utilisés dans les calculs de taux d'érosion. La détermination de ces coefficients s'est inscrite en partie dans une démarche de calage du modèle. Les valeurs attribuées aux facteurs « C » doivent ainsi permettre aux algorithmes de calcul du modèle de reproduire la charge globale de sédiments mesurée à l'exutoire du bassin versant. L'attribution des facteurs « C » aux différentes classes d'occupation du sol découlent également d'échanges auprès d'intervenants régionaux en foresterie, rassemblés par COPERNIC à l'occasion d'un atelier en janvier 2020 (COPERNIC, 2020). L'aménagement de la voirie forestière avait alors été identifié comme un élément déterminant de la pression exercée par les activités d'exploitation au cours de l'atelier, rejoignant les observations partagées par Jutras (2019) sur la problématique de l'érosion en milieu forestier. Les observations de la campagne de terrain de l'automne 2019 dans le bassin versant Gobeil ont d'ailleurs mené aux mêmes conclusions.

Une attention particulière a donc été apportée à la représentation des propriétés des routes non pavées et des chemins forestiers lors du paramétrage du modèle, tant pour le scénario de référence initial, que pour la projection des effets des pratiques de gestion anti-érosives. Les données disponibles sur les routes et chemins non carrossables (MERN, 2013; AFBF, 2019) ont été représentées sous la forme de polygones dans le système d'information géographique (SIG), permettant l'analyse fine des longueurs de parcours de l'eau et de l'inclinaison du terrain dérivées du relevé LiDAR. La superposition de ces données aux propriétés du sol et de l'occupation a permis une projection bien discriminée, au plan spatial, du risque de ruissellement de surface et d'érosion de l'ensemble des routes non pavées et des chemins forestiers non carrossables.

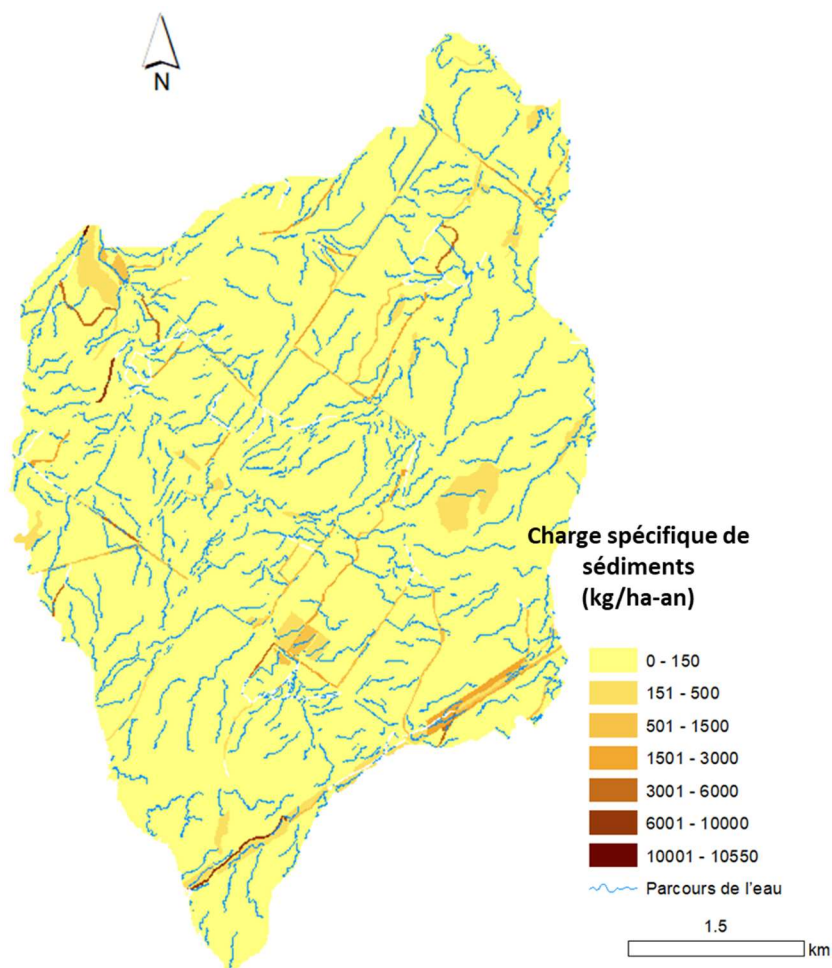
#### 4. Résultats de la modélisation GÉODEP pour le scénario de référence

Globalement, à l'échelle du micro-bassin du ruisseau Gobeil, les projections de GÉODEP ont été estimées pour 1,073 unités de réponse hydrologique homogène (URHH). Les taux d'exportation de sédiments ont été estimés pour l'ensemble du territoire cartographié sous couvert forestier (90% de la superficie du bassin), de même que pour l'ensemble des autres occupations et du réseau de routes et chemins forestiers. Le tableau 4 présente les exportations de sédiments projetées par classe d'occupation du sol pour le scénario de référence. Ces projections sont également reproduites en figure 7 à l'échelle des unités de calcul du modèle (URHH) pour l'ensemble du bassin versant du ruisseau Gobeil.

Dans l'ensemble, la charge spécifique annuelle de sédiments projetée, de l'ordre de 87 kg/ha, reflète la charge annuelle moyenne mesurée à l'exutoire du ruisseau pour la période 2017-2020 (96 kg/ha). Les exportations projetées de sédiments par classe d'occupation du sol sont fortement discriminées en faveur des routes non pavées et des chemins forestiers, reflétant les objectifs qui ont guidé le paramétrage du modèle. En moyenne, la charge spécifique annuelle de sédiments associée aux « chemins de terre » et forestiers est projetée à plus de 1,8 tonnes (T) de sédiments par hectare (tableau 4). La figure 8 illustre cette vulnérabilité à l'échelle des unités de calcul du modèle (URHH), sur une base cumulative, en comparaison des autres occupations du sol du bassin versant. Bien qu'ils ne représentent que 1,7% de la superficie du bassin versant, 35% de la charge globale de sédiments du bassin versant est attribuée aux routes non pavées et aux chemins forestiers. Cette discrimination est par ailleurs mise en relief dans la projection spatiale des émissions de sédiments à l'échelle du bassin versant (figure 7), alors que les taux d'exportation les plus élevés révèlent la position des routes et chemins documentés pour le bassin versant.

**Tableau 3. Hauteur de ruissellement et charges de sédiments totales et spécifiques projetées pour le scénario de référence pour chaque classe d'occupation du sol du bassin versant du ruisseau Gobeil.**

Classe d'occupation du sol	Superficie		Ruissellement de surface (mm)	Charge annuelle de sédiments		Charge spécifique annuelle de sédiments (kg/ha)
	(ha)	(% Total)		(kg)	(% Total)	
Prairie	5	0.4%	52	2 848	2.4%	557
Milieus perturbés	17	1.2%	71	10 371	8.7%	605
Sentiers	5	0.4%	70	4 683	3.9%	927
Friches	50	3.7%	77	3 403	2.8%	68
Forêt de feuillus	347	25.2%	77	17 235	14.4%	50
Forêt mixte	392	28.5%	72	14 643	12.2%	37
Forêt de résineux	504	36.6%	72	15 401	12.9%	31
Routes pavées	10	0.7%	70	6 252	5.2%	640
Chemins non pavés	23	1.7%	71	41 954	35.1%	1 817
Milieus humides	23	1.7%	76	2 850	2.4%	125
<b>Total</b>	<b>1 376</b>	<b>100.0%</b>	<b>62</b>	<b>119 639</b>	<b>100.0%</b>	<b>87</b>



**Figure 6. Charges spécifiques de sédiments projetées pour le scénario de référence pour chaque classe d'occupation du sol du bassin versant du ruisseau Gobeil.**

Cette forte discrimination reflète la faible couverture du sol attribué aux routes non pavées et aux chemins forestiers du bassin versant ( $C=0.125$ ). Cet état relativement dénudé se traduit en projections de fortes émissions de sédiments, compte tenu des fortes pentes qui caractérisent la région d'étude. Les projections d'émissions de sédiments varient par ailleurs de façon considérable en fonction des longueurs et des pentes des parcours de l'eau propres à chaque tronçon de routes ou de chemins. La figure 9 illustre cette dispersion à l'échelle du bassin versant du ruisseau Gobeil. Les taux d'exportation de sédiments les plus élevés, supérieurs à 5 T/ha par exemple, sont associés aux pentes de terrain de l'ordre de 10 à 13%, suivant des longueurs de parcours de l'eau compris entre 73 et 209 m.

Sur le plan pratique, deux implications principales découlent des résultats de la projection des émissions de sédiments pour le scénario de référence du bassin versant du ruisseau Gobeil.

D'abord, le relief montagneux du bassin versant fait en sorte que l'exposition du sol à nu se traduit en érosion très active, et que les sédiments sont transportés efficacement vers le ruisseau et la rivière Bulstrode plus en aval. L'observation des charges de sédiments à l'exutoire du bassin indique que ces transports sont principalement actifs lors des crues qui se produisent de la fin de l'automne jusqu'au début du printemps. Une implication pratique de ces observations est toute la pertinence de limiter l'exposition du sol durant cette période propice à la génération du ruissellement de surface. En ce qui a trait aux opérations sylvicoles par exemple, l'ouverture de chemins forestiers à l'automne demeure ainsi une pratique particulièrement à risque en raison de l'exposition du sol à nu durant cette période critique de vulnérabilité. Un aménagement plus hâtif en période estivale, permettant l'établissement d'un couvert végétal dans les fossés avant la fin de l'automne, serait ainsi une pratique à encourager afin de prévenir l'érosion. Au besoin, l'ensemencement du chemin et ses fossés par un mélange approprié de graminées et de légumineuses assurera rapidement une protection efficace en période estivale. De la même façon, l'entretien des fossés de routes non pavées en période automnale tardive favorise l'exposition des fossés à l'action du ruissellement. En alternative, un entretien limité au tiers inférieur, réalisé tôt en saison, est propice à l'établissement d'un couvert herbacé efficace contre l'érosion.

Une deuxième implication pratique tient à l'influence déterminante des longueurs et des pentes des parcours de l'eau sur les taux d'érosion mis en relief par les résultats de la modélisation. Ce constat milite d'une part pour la prise en considération du modelé du drainage de surface lors de l'établissement de la voirie forestière. Le relevé des parcours de l'eau à haute résolution (1m) réalisé dans le cadre de ce projet sur la base des données LiDAR est un outil très pertinent à cette démarche. La limitation du nombre et de l'étendue des chemins forestiers peut également être considérée en favorisant la concertation entre propriétaires voisins de lots privés.



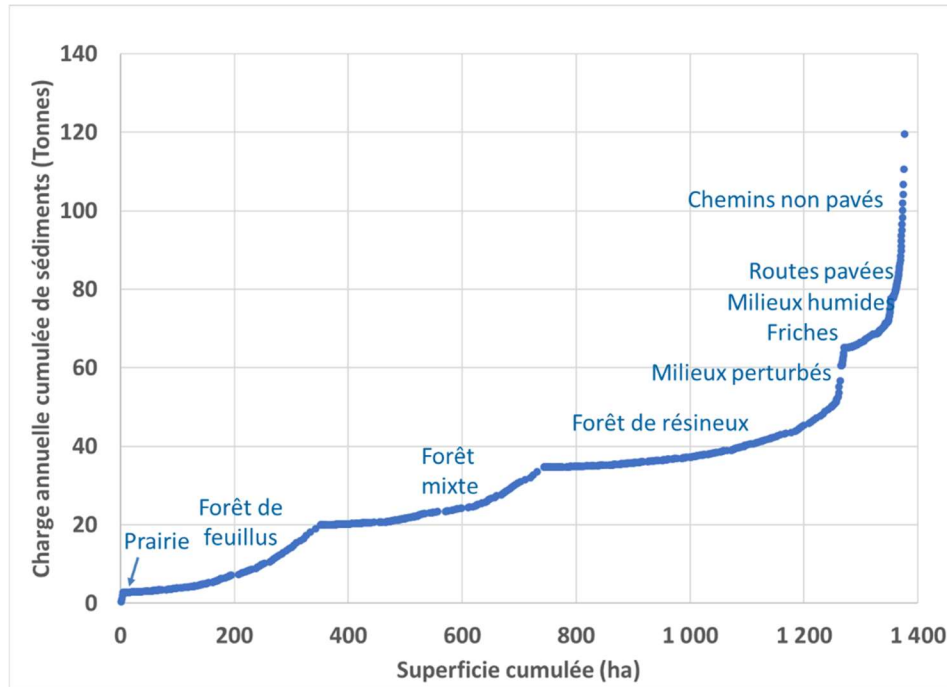


Figure 7. Charge annuelle cumulée de sédiments projetée par classe d'occupation du sol en fonction de leurs superficies respectives.

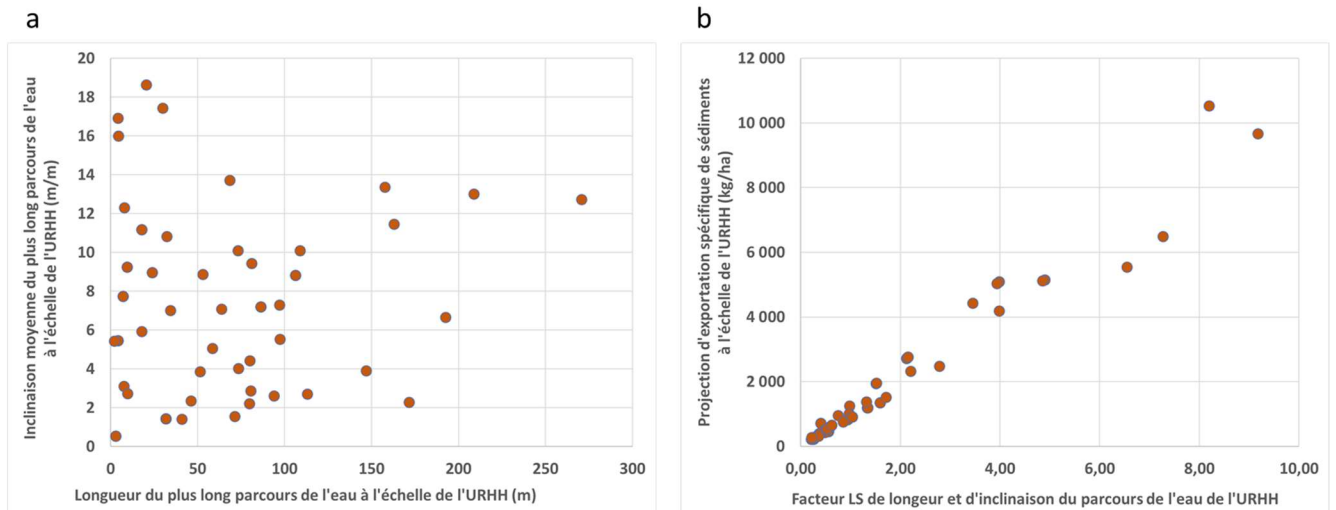


Figure 8. Dispersion des longueurs et des inclinaisons moyennes des principaux parcours de l'eau des routes non pavées et des chemins forestiers du bassin versant du ruisseau Gobeil (a) et projection de leurs taux d'exportation de sédiments en fonction du facteur topographique de vulnérabilité à l'érosion (Facteur LS).

## 5. Résultats de la modélisation GéODEP pour le scénario alternatif de gestion

Cette section du rapport présente les flux de sédiments projetés par GéODEP en réponse au scénario alternatif de gestion appliqué à l'ensemble du bassin versant du ruisseau Gobeil. Rappelons que le méta-modèle GéODEP permet à l'utilisateur de projeter, pour une parcelle de territoire donnée (URHH), l'effet de pratiques alternatives. La démarche de modélisation du scénario alternatif de gestion consiste ainsi à modifier les paramètres de gestion des différentes URHH, sans toutefois changer leurs propriétés géophysiques, telles que la nature des sols et du relief. Il est ainsi permis de projeter, pour une portion de territoire, la réduction des exportations de sédiments suivant une ou une combinaison de pratiques alternatives de gestion.

L'élaboration du scénario alternatif de gestion du bassin versant du ruisseau Gobeil cible les chemins de terre publiques et les chemins forestiers non carrossables du bassin versant. Cette perspective fait écho aux projections du scénario de référence, qui associent les vulnérabilités les plus élevées à ces occupations du sol à l'échelle du bassin versant. Ce scénario alternatif répond également aux observations relevées sur le terrain lors de la campagne de l'automne 2019, de même qu'aux préoccupations rapportées par les intervenants régionaux du milieu forestier lors de l'atelier de janvier 2020 parrainé par COPERNIC.

Deux pratiques de gestion alternative ont été considérées dans la simulation, soit l'ensemencement des tronçons de chemins forestiers et des fossés de routes de terre, de même que l'aménagement de structures de rétention des sédiments pour les secteurs les plus vulnérables du réseau. À défaut de données disponibles, dans la littérature scientifique, pertinentes à l'évaluation de l'efficacité de ces pratiques dans la réduction des charges de sédiments en milieu forestier et en réseau routier, les coefficients d'efficacité retenus pour la simulation de GéODEP du bassin du ruisseau Gobeil s'inspirent des résultats documentés sur la qualité de l'eau en micro-bassins versants principalement sous occupation agricole.

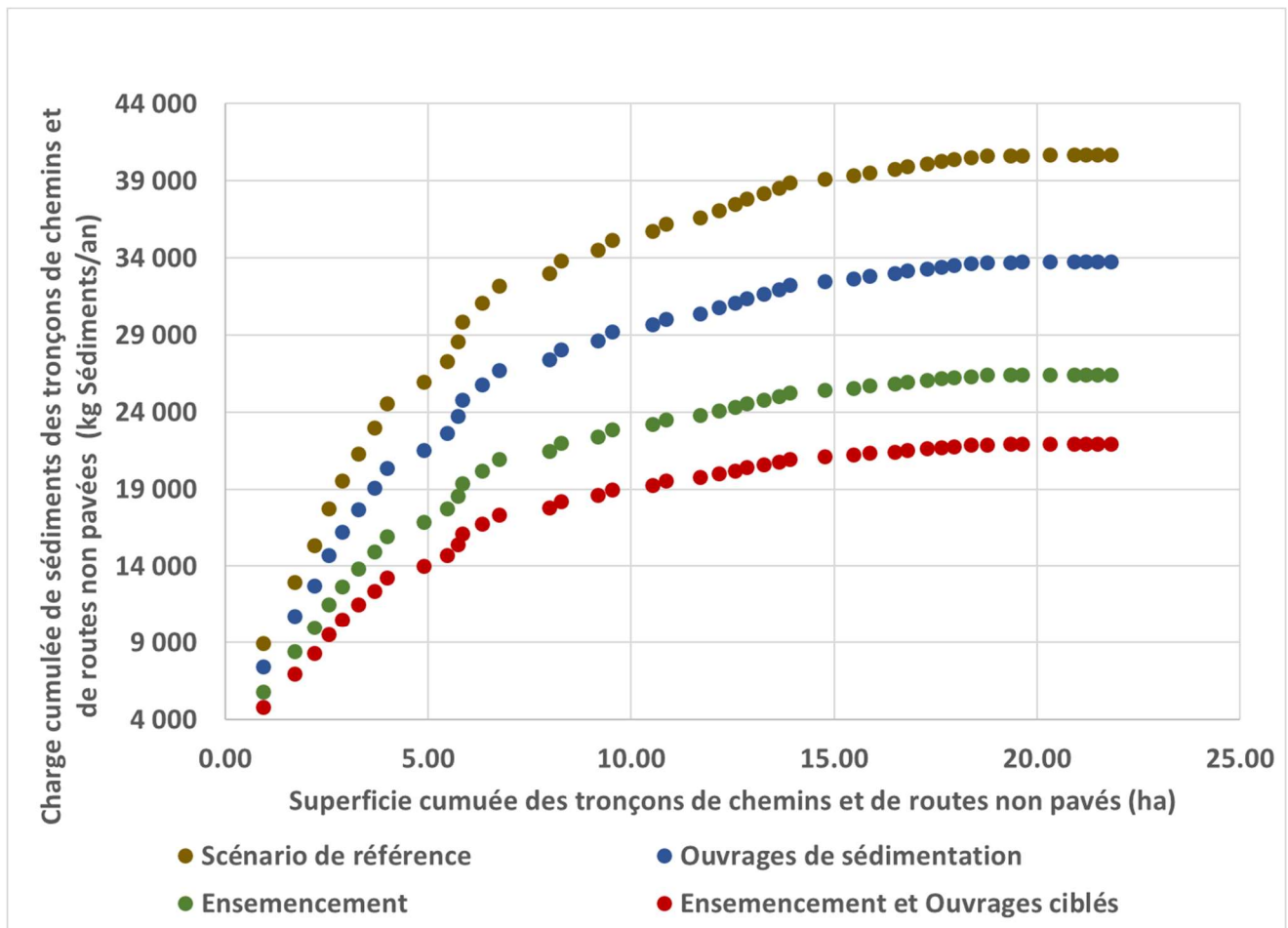
### Ensemencement de couvertures anti-érosives

Pour l'ensemencement de cultures de couverture anti-érosives, les algorithmes de GéODEP attribuent une efficacité moyenne de 35% dans la réduction du taux d'érosion. En champs agricoles, cette efficacité moyenne est associée à l'implantation intercalaire de légumineuses fourragères dans les céréales à paille ou de graminées en culture du maïs. Des taux réduits d'exportation de sédiments du même ordre ont, par ailleurs, été documentés par suivi hydrométrique à l'échelle du micro-bassin en Estrie, suivant l'implantation de cultures de couverture (Michaud et col., 2017). Le même taux de 35%, appliqué ici aux chemins forestiers et aux fossés de chemins de terre du bassin versant du ruisseau Gobeil, apparaît réaliste dans la mesure où il serait associé à une couverture complète de la surface du sol laissé à nu après des travaux d'aménagement des chemins ou d'entretien des fossés de routes non pavées. Il est cependant convenu que les fossés de route creusés à même les nombreux affleurements rocheux du bassin versant sont exclus de cette projection. Leur contribution aux charges de sédiments au ruisseau a d'ailleurs été considérée comme marginale lors du paramétrage du modèle en considérant une très faible érodabilité du sol ( $K=0.002$ ).

## Structures de rétention des sédiments

Le taux générique moyen de 17% de réduction de la charge de sédiments attribué par GÉODEP au scénario d'aménagement d'ouvrages de contrôle de la sédimentation a été retenu pour la présente étude. Ce taux reflète les observations en milieu agricole en Montérégie, où l'effet de fossés-avaloirs ont été évalués sur le flux de sédiments et de phosphore particulaire au cours d'eau principal (Michaud et col., 2005, 2007). A défaut d'autres données publiées applicables au milieu forestier et au réseau routier au Québec, ce taux d'abattement de la charge de sédiment est estimé réaliste en conservant à l'esprit qu'il s'agit d'un ordre de grandeur moyen, résultant d'une protection d'ensemble des zones sensibles du réseau de voirie publique et forestière du bassin versant du ruisseau Gobeil.

**Figure 9. Charges cumulées de sédiments des tronçons de chemins forestiers et de routes non pavées du bassin versant du ruisseau Gobeil suivant le scénario de référence et trois scénarios alternatifs de gestion du réseau de voirie.**



Concrètement, le design d'ouvrages de contrôle de la sédimentation est généralement spécifique aux sites où ils sont appliqués et il demeure hors de portée de la présente étude de proposer des designs précis pour tout le territoire d'étude. Des recommandations émises au Québec par différents intervenants en matière d'aménagement des fossés de route et de chemins forestiers offrent néanmoins d'identifier quelques balises. En aménagement des fossés, Lajeunesse (2012) associe l'applicabilité des boudins de rétention aux petites aires de captage de faible inclinaison (<3.0%). Les seuils de rétention sont plutôt associés aux terrains de 3 à 10 % de pente, alors que les terrains de plus de 10% commandent généralement de l'enrochement. Pour la prévention de l'érosion des chemins forestiers, des recommandations techniques du même ordre sont décrites par le RAPPEL (2017). Suivant l'analyse des parcours de l'eau, des tronçons de routes et, des chemins du bassin versant, réalisée dans le cadre de la présente étude (figure 8), la plupart des tronçons se situent dans la fourchette d'inclinaison de la pente de 3 à 8% et commanderaient ainsi des ouvrages de type du seuil de rétention.

La figure 9 illustre les projections de charges sédiments par GÉODEP pour les scénarios de référence et les trois scénarios alternatifs de gestion, tels qu'appliqués aux 44 principaux tronçons de chemins forestiers et chemins carrossables non pavés du bassin versant (superficie minimale de 0,10 ha). Retenons ici que cette représentation ne s'applique qu'aux tronçons délimités sur la base des données d'occupation du sol disponibles pour le bassin versant, tel que décrites antérieurement en section 3.2 (Paramétrage du modèle). Ces données ne sont pas considérées à jour en ce qui a trait à la voirie forestière. La mise en œuvre éventuelle d'une action ciblée sur l'aménagement de la voirie forestière commanderait ainsi une mise à jour des informations sur les chantiers récents et prochains d'opérations forestières. Retenons cependant que les analyses spatiales réalisées dans le cadre de la présente étude, notamment sur la modélisation des parcours de l'eau, pourraient s'avérer un support efficace dans le ciblage des zones critiques de vulnérabilité, de même que dans le dimensionnement des ouvrages.

Suivant la modélisation du scénario de référence, les effets des trois scénarios alternatifs de gestion suivants ont été projetés :

- le scénario alternatif No.1 projette les effets d'un ensemencement de l'ensemble des chemins forestiers et des fossés des routes non pavées;
- Le scénario alternatif No.2 projette les effets de l'aménagement d'ouvrages de sédimentation sur l'ensemble des chemins forestiers et des fossés des routes non pavées;
- Et enfin le scénario alternatif No.3 inclue l'ensemencement de l'ensemble des chemins forestiers et des fossés des routes non pavées, mais réserve les ouvrages de captage aux 14 tronçons les plus vulnérables du réseau de voirie (charge spécifique de sédiments supérieure à 5 T/ha). Ce scénario est présumé optimal sur le plan du rapport coût : efficacité des ouvrages.

Tel qu'illustré en figure 9, l'atténuation projetée de la charge de sédiments associée aux scénarios no.1, 2 et 3 est de l'ordre de 35%, 17% et 44%, respectivement, par rapport aux projections du scénario de référence (40,7 tonnes de sédiments par an). L'ensemencement (scénario no.1) apparaît d'emblée comme une pratique présentant un rapport coût : efficacité plus intéressant que les ouvrages. À titre indicatif, considérant par exemple un coût de 250\$/ha de superficie

traitée, soit environ le triple de celui documenté pour une application agricole (Michaud et col., 2019, Biron et col., 2020), le rapport coût : efficacité de l'ensemencement serait de l'ordre de 0.35\$/kg de sédiments. Pour l'ensemble des 21.8 ha traités, la réduction de la charge annuelle de sédiments totalise alors 14,2 T de sédiments, pour une réduction spécifique moyenne de 653 kg de sédiments par hectare.

Pour les ouvrages, retenant l'hypothèse d'un coût d'aménagement de l'ordre d'environ 1,200\$/structure, reflétant les coûts d'aménagement de bassins de captage réalisés en milieu agricole (Michaud et col., 2019, Biron et col. 2020), le ratio coût : efficacité est de l'ordre de 3,07\$/Kg de sédiments pour les 14 tronçons les plus vulnérables du réseau de voirie. Près de 5.5 T de sédiments sont retenus, pour une réduction spécifique moyenne de 813 kg de sédiments par hectare traité.

Pour le scénario alternatif no.3, combinant l'ensemencement sur l'ensemble des 21,8 ha ciblés et l'aménagement d'ouvrages de sédimentation sur les 14 tronçons les plus vulnérables, le rapport coût : efficacité est de 1,22\$/kg de sédiments. Une réduction de 17,8 T de la charge de sédiments est projetée, pour une réduction spécifique moyenne de 816 kg de sédiments par hectare traité.

Ces projections de rapport coût : efficacité doivent être considérées à titre indicatif, à défaut de données plus précises sur les coûts réels documentés pour l'aménagement d'ouvrages de contrôle de la sédimentation et de l'ensemencement de routes et chemins forestiers. Il en est de même pour les efficacités des pratiques retenues dans la présente simulation. La base de données géographiques réalisée dans le cadre du projet permet néanmoins de mettre à jour ces balises et de projeter les coûts et les efficacités pour les différents secteurs du bassin versant. Pour une première application de GÉODEP au milieu forestier, l'outil est estimé pertinent dans une perspective de planification stratégique d'investissements consentis dans la réduction des charges de sédiments en bassin forestier. La valorisation du relief de haute précision généré par le capteur LiDAR, particulièrement, constitue un important atout dans l'aménagement optimal du réseau de voirie forestière. L'ensemble des données à référence spatiale utilisées en support à la modélisation sont intégrés dans un système d'information géographique à haute résolution (1m) et mis à la disposition d'éventuels promoteurs de projets ciblés sur l'aménagement du bassin versant du ruisseau Gobeil



## 6. RÉFÉRENCES CITÉES

Agence forestière des bois-francs (AFBF). 2019. Cartographie du réseau de chemins forestiers. Adapté de COPERNIC.

Biron, P., Michaud, A., Massey, W., Stämpfli, N., Niang, M., Lagacé, R. et Martinelli, G. (2020). Projet EPERLAB : Ensemble pour l'étude et la restauration de la rivière Boyer. Rapport présenté au programme Odyssée Saint-Laurent du Réseau Québec Maritime. Université Concordia, 150 pages. <https://www.irda.qc.ca/fr/telechargement/?s=7080&r=/fr/publications/>

Centre de géomatique du Québec. 2018. Relevé LiDAR.

COPERNIC. 2019. Relevé LiDAR du bassin versant de la rivière Bulstrode.

COPERNIC 2020. Rencontre de démarrage du comité forestier. Restauration du débit écologique de la rivière Bulstrode pour la réduction de la sédimentation des prises d'eau potable de Victoriaville et Princeville. 9 janvier 2020.

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/>

IRDA. 2019. Banque de données hydro-pédologiques sur les sols du Québec.

Jutras, S. 2019. Communication personnelle.

Lajeunesse, 2012. GUIDE TECHNIQUE, Gestion environnementale des fossés. MRC Brome-Missisquoi, MRC du Granit et Rappel. ISBN 978-2-9807299-4-2

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.

Ministère de l'énergie et des ressources naturelles (MERN). 2013, La base de données topographiques du Québec (BDTQ) Québec à l'échelle 1/20 000. Gouvernement du Québec.

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. Canadian journal of soil science, 87,3, 329-344.

Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. 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., J. Desjardins, M. Dubuc, A. Drouin, M. Grenier. 2017. « Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles - Réseau Massawippi, Estrie ». IRDA. 77 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/telechargement/?s=6820&r=/fr/publications/>

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., M. Niang, L. Belzile, F. Chouinard, J. Bérubé. 2019. Analyse coûts-efficacité des actions proposées pour réduire de 40 % les charges de P de la rivière La Roche à la baie Missisquoi. IRDA. 70 p. <https://www.irda.qc.ca/fr/telechargement/?s=6714&r=/fr/publications/>

RAPPEL, 2017. Guide pour contrer l'érosion des chemins forestiers. RAPPEL, Conférence régionale des élus de l'Estrie, MRC du Granit et Association Pour la Protection du lac Mégantic. ISBN 978-2-922893-12-0

Rompré, M., Laflamme, G., Ouellet, L., Carrier, D., Dubé J-C., Pagé, F., 1984, Étude pédologique du Comté d'Arthabaska, Service de Recherche en Sols, MAPAQ, 84 p.

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.

7. Annexe 1. Séries chronologiques comparées des débits et flux de sédiments des bassins versants affluents de la rivière Bulstrode (échelle commune).

