



GEODEP
L'OUTIL DE DIAGNOSTIC DES EXPORTATIONS DE PHOSPHORE
SPATIALISÉ

Appliqué au ruisseau des Anges (Lanaudière)

DOCUMENT DE TRAVAIL

Par
L'INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN
AGROENVIRONNEMENT inc. (IRDA)

Pour la Fédération de l'UPA de Lanaudière

Mars 2015

Équipe de réalisation :

Aubert Michaud,
Arianne Drouin,
Jacques Desjardins,
Mohamed Niang.

INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT inc.
(IRDA)

Le rapport peut être cité comme suit :

Michaud, A. R., J. Desjardins, M. Dubuc, I. Beaudin et M. Niang. 2015. Application de GéODEP, l'outil de diagnostic spatialisé des exportations de phosphore, au ruisseau des Anges, dans Lanaudière. Rapport final de projet et SIG. Présenté l'UPA de Lanaudière. IRDA. 22 p.



L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif, constituée en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation des Exportations (MEIE).

Pour nous joindre :

Centre de recherche de Québec et siège social
IRDA
2700, rue Einstein
Québec (Québec)
G1P 3W8
Tél. : 418 643-2380

Centre de recherche de Saint-Bruno-de-Montarville
IRDA
335, rang des Vingt-Cinq Est
Saint-Bruno-de-Montarville (Québec)
J3V 0G7
Tél. : 418 653-7368

Table des matières

Table des matières.....	ii
Liste des tableaux.....	iii
Liste des figures	iv
1 mise en contexte de l'étude.....	5
2 Méthode.....	6
2.1 Territoire à l'étude.....	6
2.2 Paramétrage du modèle.....	7
2.3 Traitement des données hydrométriques de validation	13
3 résultats	15
4 CONCLUSION.....	18
5 Références citées.....	22

Liste des tableaux

Tableau 1. Répartition des cultures dans le bassin versant du ruisseau des Anges.	7
Tableau 2 : Sources et types de données géospatiales utilisées en support à l'application de GÉODEP au territoire à l'étude.	9
Tableau 3 : Valeurs des paramètres pertinents à la régie des cultures et à la richesse des sols utilisées en support à la modélisation hydrologique du ruisseau des Anges.....	11
Tableau 4 : Strates retenues pour la modélisation des flux de sédiments et de phosphore, et distribution des observations de débits et de qualité de l'eau associées à chacune des strates.	13
Tableau 5 : Charges annuelles spécifiques et concentrations moyennes pondérées pour le débit de matières en suspension (MES) et de phosphore estimées à l'exutoire du Ruisseau des Anges pour la période 1991 à 1996.	14
Tableau 6. Séparation des flux de phosphore et de matières en suspension suivant la stratification des débits et de la saison.....	14
Tableau 7. Distribution des hauteurs d'eau et des exportations annuelles de sédiments et de phosphore à l'échelle des unités de réponse hydrologique et par classe d'occupation du sol résultant de la modélisation hydrologique GÉODEP à l'échelle du bassin versant du Ruisseau des Anges.....	17
Tableau 8. Comparaison des résultats de la simulation GÉODEP pour l'année de référence 2013 avec les flux évalués sur la base du suivi hydrométrique pour la période 1991-1996 à l'exutoire du bassin versant du Ruisseau des Anges.....	17

Liste des figures

Figure 1. Occupation des sols du bassin versant du ruisseau des Anges.	6
Figure 2. Les sols du bassin versant du ruisseau des Anges.....	8
Figure 3. Hypothèses retenues dans le drainage des terres du bassin versant....	8
Figure 4 : Richesse moyenne des sols en P (Kg P/ha) pour les municipalités du territoire à l'étude (Beudet et al., 2009).....	12
Figure 5 : Hauteur d'eau annuelle ruisselée exprimée à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion de référence.....	19
Figure 6 : Exportation annuelle de sédiment exprimée à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion de référence.....	19
Figure 7 : Exportation annuelle de phosphore total exprimé à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion de référence.....	20
Figure 8 : Hauteur d'eau annuelle ruisselée exprimée à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion « tout maïs ».....	20
Figure 9 : Exportation annuelle de sédiments exprimée à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion « tout maïs ».....	21
Figure 10 : Exportation annuelle de phosphore total exprimé à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion « Tout maïs ».....	21

1 MISE EN CONTEXTE DE L'ÉTUDE

La présente étude avait pour objectif de documenter la vulnérabilité du bassin versant du ruisseau des Angés, affluent de la rivière L'assomption dans Lanaudière, aux processus de ruissellement, d'érosion et d'exportation de phosphore. La démarche s'inscrit en appui à l'action concertée ZIPP (Zone d'intervention prioritaire sur le phosphore) coordonnée par la fédération de l'UPA de Lanaudière dans la région d'étude. Les simulations des hauteurs d'eau ruisselées et drainées, des taux d'érosion et d'exportation des différentes formes de phosphore ont été supportées par l'utilitaire géomatique GÉODEP développé par l'IRDA (Drouin et al., 2014). Les observations de débits et de la qualité de l'eau colligées respectivement par les équipes du Centre d'expertises hydriques du Québec (CEHQ) et de la Direction su suivi de l'état de l'environnement du MDDELCC ont été mis à profit dans la reconstitution des flux historiques (1991-1996) à l'exutoire du bassin à l'étude. La comparaison de ces flux observés à ceux simulés par GÉODEP a ainsi permis d'évaluer la performance du modèle de prédiction hydrologique.

Les sections suivantes du rapport présentent sommairement la méthodologie et les résultats de la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant du Ruisseau des Angés. Un système géographique à haute résolution (1m) est également transmis au promoteur du projet, l'UPA de Lanaudière. Le SIG inclut toutes les données géospatiales mise à profit dans la réalisation de l'étude et l'ensemble des résultats. Ces derniers inclue les résultats de simulations associés à un scénario de référence, représentatif des systèmes cultureux en place, tel que documenté sur la base des informations disponibles, de même qu'un scénario de régie uniforme « Tout maïs » mettant en relief l'influence des propriétés des sols sur les prédictions hydrologiques. Rappelons en terminant que l'utilitaire GÉODEP permet d'actualiser l'ensemble des données d'entrée, sur la base d'informations plus précises à l'échelle parcellaire, de même que la simulation de retombées environnementales associées à des scénarios alternatifs de gestion. Pour de plus amples informations sur les sources et les requêtes spatiales de traitement de données, de même que sur les algorithmes de calcul des différents modules du logiciel, le lecteur est invité à se référer aux guides de l'utilisateur de GÉODEP (Drouin et al., 2013) et de l'ODEP (Michaud et al., 2009). Une mise à jour de GÉODEP est par ailleurs cours, intégrant notamment la prédiction des pertes d'azote.

2 MÉTHODE

2.1 Territoire à l'étude

Le bassin versant à l'étude couvre une superficie de 3,638 hectares, dont 70 % de l'occupation est dédiée aux activités agricoles (2,553 ha). L'occupation du sol pour l'année de référence 2013 est illustrée en figure 1, alors que le tableau 1 décrit la répartition des différentes cultures dans le bassin pour la même année. Celles-ci reflètent les principales vocations agricoles du territoire à l'étude, soit la production de grandes cultures, la production maraîchère et la production laitière.

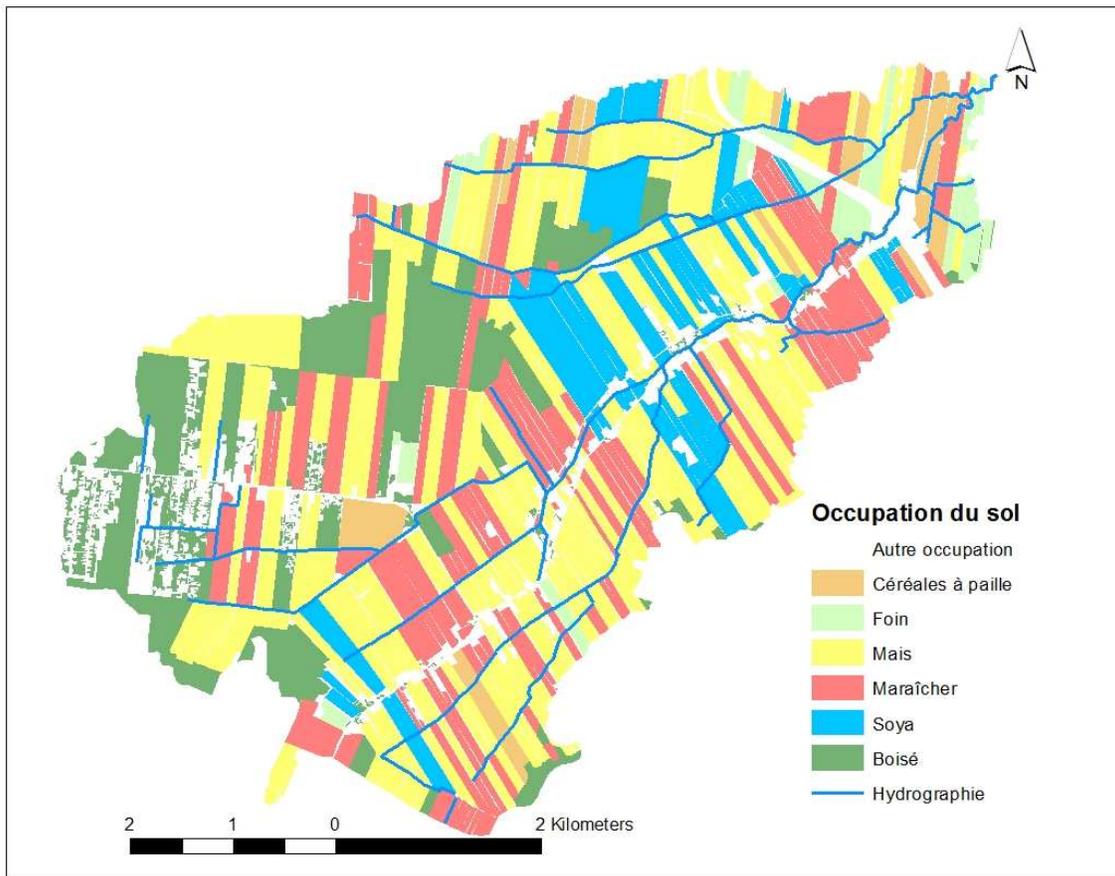


Figure 1. Occupation des sols du bassin versant du ruisseau des Anges.

Tableau 1. Répartition des cultures dans le bassin versant du ruisseau des Anges.

Culture	Superficie
Céréales à paille	55,7
Prairie	120,1
Maïs	1 224,2
Maraîcher	718,7
Soya	355,0

La figure 2 illustre la distribution spatiale des séries de sol du territoire à l'étude. Globalement, les sols de la portion amont du bassin versant sont associés à des textures sablonneuses fines, qui contrastent avec les textures plus lourdes présentes dans la portion aval du bassin. La figure 3 illustre pour sa part les superficies en culture qui ont été considérées drainées pour les fins de la modélisation, en raison de leur appartenance au groupe hydrologique A ou B, ou associées à une texture légère et une perméabilité élevée de la couche arable..

2.2 Paramétrage du modèle

L'outil géospatial GEODEP a été utilisé en support à la caractérisation de la région à l'étude. GÉODEP consiste en une version spatialisée de l'ODEP (Outil de diagnostic des exportations de phosphore) développé antérieurement par l'équipe scientifique de l'IRDA en collaboration avec la commission de la fertilité des sols du CRAAQ et du MAPAQ (Michaud et al., 2009). Concrètement, les différents modules de GÉODEP mettent à profit les banque de données géospatiales généralement disponibles en milieu rural au Québec (ex : données d'élévation, pédologie, plans de culture, etc), de même que des données pertinentes à la régie des cultures, afin de produire des estimations d'hauteurs d'eaux ruisselées et drainées, de même que des taux d'exportation de sédiments et de phosphore. GÉODEP reprend essentiellement les algorithmes développés et validés lors de la conception de l'ODEP (Outil diagnostique des exportations de phosphore), et qui ont été intégrés à un Système d'Information Géographique (SIG). Pour des détails sur le fonctionnement de GEODEP et les équations de l'ODEP, le lecteur est invité à se référer aux manuels de l'utilisateur de ces deux outils (Drouin et al., 2013; Michaud et al., 2009).

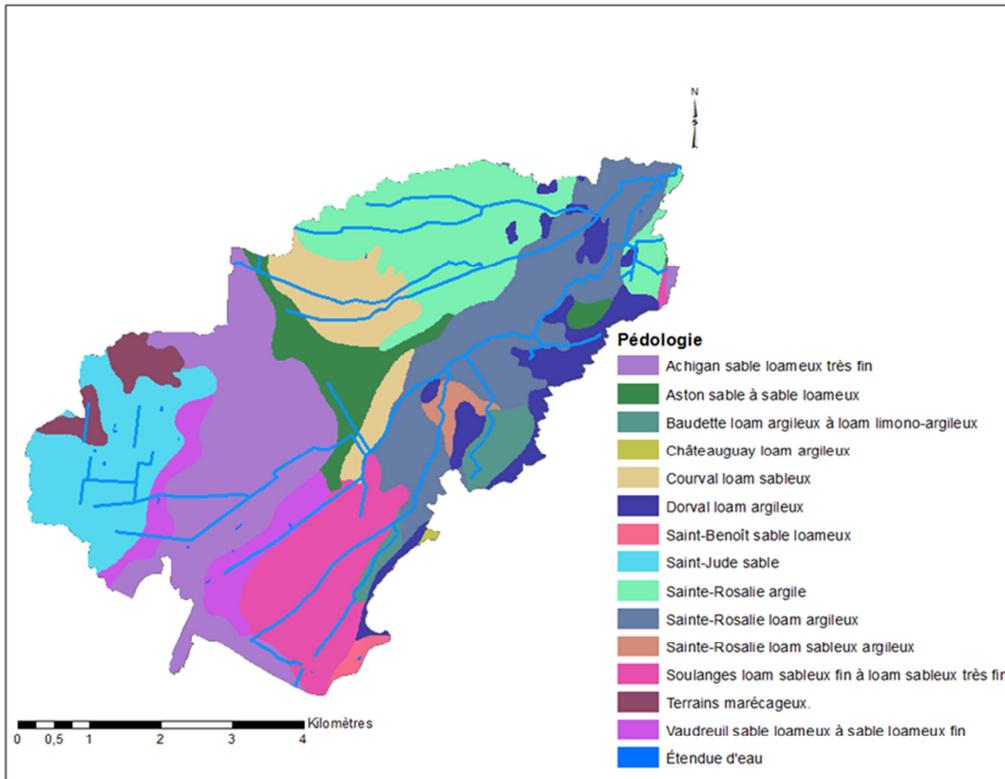


Figure 2. Les sols du bassin versant du ruisseau des Anges.

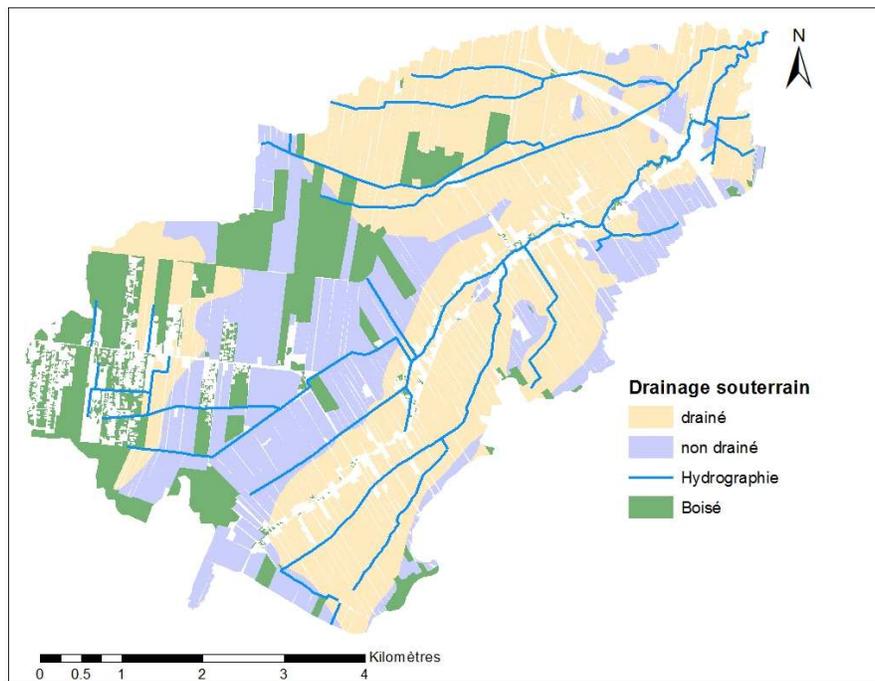


Figure 3. Hypothèses retenues dans le drainage des terres du bassin versant.

Tableau 2 : Sources et types de données géospatiales utilisées en support à l'application de GÉODEP au territoire à l'étude.

Type de données	Sources
Modèle numérique de terrain (élévation)	MNT LiDAR fourni par l'UPA de Lanaudière.
Sous-bassins	Sous-bassins fournis par l'UPA de Lanaudière correspondant aux stations de suivi des diatomées.
Hydrographie linéaire et surfacique	Hydrographie provenant de la BDTQ.
Cultures	Banque de données sur les cultures assurées de La Financière Agricole du Québec et Inventaire annuel des cultures de Agriculture et Agroalimentaire Canada. Années utilisées : 2013 et 2012 (pour obtenir le précédent cultural).
Autres utilisations du territoire	Carte écoforestière du MRN.
Pédologie	Carte des sols de l'IRDA et du MAPAQ.

Le paramétrage du modèle GÉODEP requiert différents ensembles de données géospatiales. Le tableau 2 rapporte les sources des données importées aux fins de l'application de GÉODEP au territoire à l'étude. Certaines banques de données géospatiales sont également fournies par le modèle en support au calcul de certains paramètres hydrologiques ou agronomiques. Les bases de données de GÉODEP suivantes ont été mises à profit dans le cadre du présent exercice de modélisation hydrologique :

- Base de données sur les statistiques des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec publiée sur le site Agri-réseau (Beaudet et al., 2009). Cette base de données contient pour un grand nombre de municipalités du Québec des informations sur des analyses de sol réalisées entre 1995 et 2001. GÉODEP utilise les valeurs moyennes colligées par municipalité des richesses en P Mehlich-3 (kg/ha), des saturations moyennes des sols en phosphore (%) et des concentrations en Aluminium (mg/kg) à titre de valeurs par défaut pour ces paramètres obligatoires aux calculs de flux de P, de même que dans calcul des valeurs par défaut des taux d'apport d'engrais de ferme ou minéraux.

- Base de données agroclimatiques composée de 27 sous-régions en support à la pondération des facteurs agroclimatique représentatifs des différentes régions du Québec. Ces facteurs servent notamment à ajuster les prédictions de la lames d'eau ruisselée..
- Base de données des sols de l'ODEP. Cette base de données a été créée dans le cadre du projet ODEP. Elle contient, pour un grand nombre de séries de sol québécoises, des informations sur la texture des sols, le taux de matière organique, la perméabilité, la structure, le P naturel dans le sol et le groupe hydrologique. Toutes ces propriétés sont mises à profit par les algorithmes de calcul de GéODEP. Cette base de données est expliquée davantage dans le manuel de l'utilisateur de l'ODEP (Michaud et al., 2009).

Bien que plusieurs paramètres pertinents aux propriétés des sols et à la régie des champs sont attribués par défaut dans GéODEP, ces derniers peuvent être modifiés afin de représenter le plus fidèlement possible la territoire à l'étude. Le tableau 3 rapporte les valeurs de ces paramètres utilisées pour la modélisation du ruisseau des Anges. La figure 3 illustre les richesses des sols en P documentées dans le modèle suivant les moyennes municipales couvrant le territoire à l'étude. Les taux d'apports de phosphore sous la forme d'engrais de ferme ou minéral s'inspirent des besoins des cultures et de la richesse des sols en P, suivant le guide de fertilisation du CRAAQ. Un premier scénario de régie des champs modélisé par GéODEP est basé sur l'occupation du sol de 2013. Cette modélisation est désignée « scénario de référence » et se veut représentative du portrait actuel des systèmes cultureux dans le bassin versant. Le tableau 3 rapporte les hypothèses de régie des champs retenus pour le scénario de référence. Un second scénario « tout maïs » a également été appliqué à l'ensemble des superficies en culture du bassin. Ce scénario de régie uniforme de culture du maïs grain comporte un labour d'automne, un apport de 40 kg P₂O₅/ha en engrais de ferme incorporé en pré-semis et 20 kg P₂O₅/ha d'engrais minéral au semis. Puisqu'il traduit une régie de culture uniforme, ce scénario témoigne de la vulnérabilité intrinsèque du parcellaire au ruissellement, à l'érosion et à l'exportation de P.

Tableau 3 : Valeurs des paramètres pertinents à la régie des cultures et à la richesse des sols utilisées en support à la modélisation hydrologique du ruisseau des Anges.

Paramètre	Valeur
P Mehlich-3 P/AL Mehlich-3 AL Mehlich-3	Saint-Roch-Ouest : 404 / 17.6 / 1089; Saint-Roch-de-l'Achigan : 255 / 10 / 1154; Saint-Lin – Laurentides : 240 / 9 / 1220; Terrebonne : 140 / 5.6 / 1108; Mascouche : 161 / 6 / 1251.
Travail du sol	Maïs et céréales : labour à l'automne; Soya : déchaumage à l'automne.
Drainage	Territoire agricole à environ 66 % sous drainage souterrain systématique (Groupes hydrologiques C et D, et textures sableuses avec code de perméabilité 3 et moins.
Bandes riveraines	Inférieure à 1 m pour maïs, soya, maraicher; De 1 à 3 m pour céréales et cultures mixtes; Plus de 3 m pour foin et autres occupations.
Structure de captage	Partiel pour le maïs et le soya, absent pour les autres cultures.
Fertilisation organique	40 kg P ₂ O ₅ /ha sur le maïs et les céréales à paille en pré-semis, en post-levée sur les prairies après coupes (2).
Fertilisation minérale P	20 kg P ₂ O ₅ /ha sur les cultures annuelles; 60 kg P ₂ O ₅ sur les cultures mataîchères.

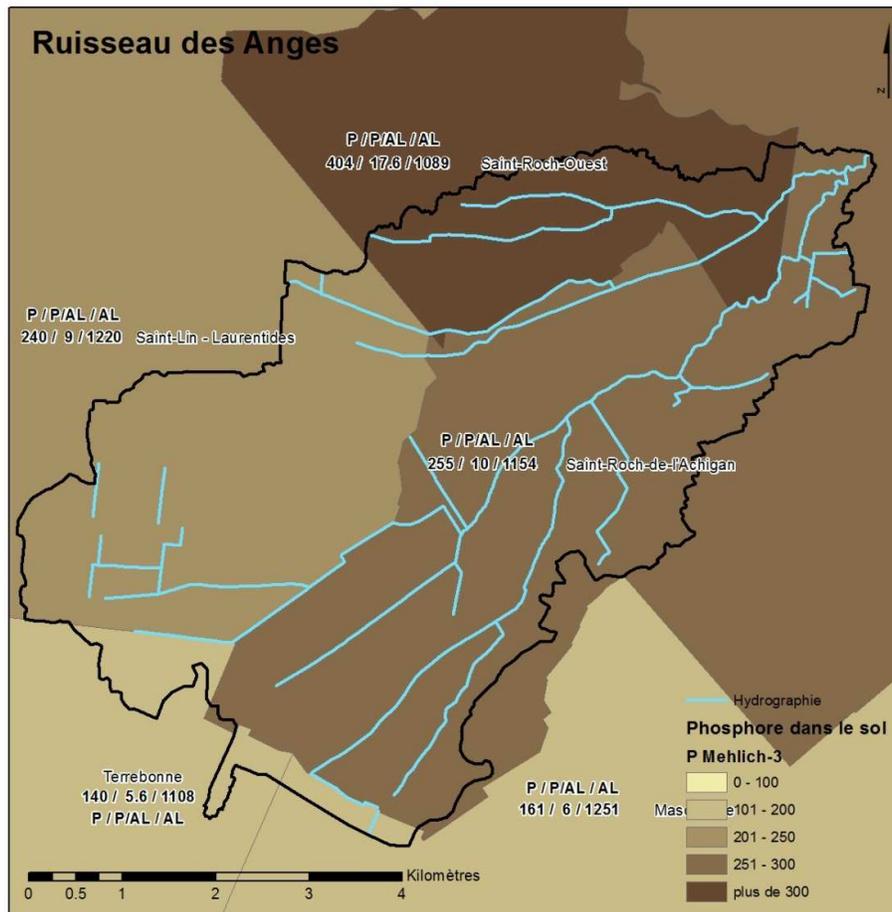


Figure 4 : Richesse moyenne des sols en P (Kg P/ha) pour les municipalités du territoire à l'étude (Beudet et al., 2009).

2.3 Traitement des données hydrométriques de validation

Afin d'évaluer la performance du modèle de prédictions hydrologiques GÉODEP, les flux de matières en suspension (MES) et de phosphore (P) ont été reconstitués à partir d'observations hydrométriques historiques du Ruisseau des Anges. Les débits journaliers colligés par le Centre d'expertise hydrique du hydrométrie (CEHQ) disponibles en ligne pour la période du 6 août 1986 au 13 mars 1997 ont ainsi été couplés aux 249 observations de qualité de l'eau colligées par la Direction du suivi de l'état de l'environnement (DDEE) du MDDELCC disponibles en ligne pour la période du 7 août 1988 au 14 décembre 1997. Les charges de nutriments et de sédiments ont été estimées par modélisation statistique à l'aide du logiciel FLUX (Walker, 1998). Le modèle statistique établit d'abord les relations entre les concentrations des paramètres de qualité de l'eau et les débits du cours d'eau, suivant différentes strates de débits et de saisons, puis applique ce modèle aux calculs de flux journaliers. .

Le tableau 4 présente les différentes strates retenues pour la modélisation, de même que la distribution des observations de débits et de qualité de l'eau associées à chacune d'elle. Le tableau 5 présente les résultats de la modélisation des flux de sédiments et de phosphore pour la période à l'étude (1991-1996). Les charges spécifiques annuelles (kg/ha) sont exprimées par rapport à la superficie totale du bassin versant, soit 3638 ha, dont 70% est actuellement en culture. Une charge moyenne de phosphore de l'ordre de 1,25 kg P par année témoigne d'une pression environnementale élevée à l'époque, malgré une perte de sol relativement modeste à 390 kg MES/ha-an. Le ratio P :MES élevé de même qu'une perte de P largement dominée par la forme soluble témoignent vraisemblablement d'une problématique de gestion de la fertilisation. Globalement, les coefficients de variation des modèles de FLUX sont en deçà de 15%. Un tel niveau d'ajustement est estimé satisfaisant compte tenu de la superficie du bassin, qui conditionne des réponses hydrologiques rapides.

Tableau 4 : Strates retenues pour la modélisation des flux de sédiments et de phosphore, et distribution des observations de débits et de qualité de l'eau associées à chacune des strates.

Strate	Débit (mm/jr)	Période	Lame d'eau exportée (mm)			Observ. qualité N	Débit journalier moyen (mm/jr)
			Total (1919 jrs)	N	Moyenne Annuelle		
1	< 1,1	annuel mai à novembre	475	1352	90	116	0,69
2	> 1,1	décembre à avril	641	238	122	19	7,38
3	> 1,1		1346	329	256	22	6,73
Global			2463	1919	469	157	2,34

Tableau 5 : Charges annuelles spécifiques et concentrations moyennes pondérées pour le débit de matières en suspension (MES) et de phosphore estimées à l'exutoire du Ruisseau des Anges pour la période 1991 à 1996.

Paramètre de qualité de l'eau	Octobre 1991 à décembre 1996		
	Ruisseau des Anges		
	Charge (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV ¹
Matières en suspension	390	74 448	0,144
Phosphore total	1,25	239	0,138
Phosphore particulaire	0,41	79	0,130
Phosphore total en solution	0,84	161	0,138
Hauteur d'eau exportée	469 mm/an		
Durée du monitoring	1919 jours		

⁽¹⁾ Coefficient de variation de l'estimation de la charge estimée par validation croisée.

Tableau 6. Séparation des flux de phosphore et de matières en suspension suivant la stratification des débits et de la saison.

Phosphore total					
Strate	Pente	Signif	Charge (kg)	Conc, (ug L-1)	CV
1	-0,072	0,202	4 418	229	0,093
2	0,449	0,091	7 233	277	0,353
3	0,168	0,512	12 276	224	0,166
Global			23 926	239	0,138
Phosphore total solide					
Strate	Pente	Signif	Charge (kg)	Conc, (ug L-1)	CV
1	-0,188	0,011	2 106	109	0,122
2	0,428	0,058	2 584	99	0,284
3	-0,075	0,812	3 228	59	0,208
Global			7 919	79	0,13
Phosphore total en solution					
Strate	Pente	Signif	Charge (kg)	Conc, (ug L-1)	CV
1	0,137	0,045	2 482	128	0,101
2	0,289	0,28	4 314	165	0,308
3	0,314	0,234	9 353	171	0,188
Global			16 149	161	0,138
Matières en suspension					
Strate	Pente	Signif	Charge (kg)	Conc, (ug L-1)	CV
1	0,125	0,091	1 191 692	61 645	0,11
2	-0,016	0,95	1 833 023	70 290	0,274
3	0,397	0,085	4 432 475	80 947	0,211
Global			7 457 190	74 448	0,144

Afin de comparer les flux observés avec les flux simulés par GÉODEP, il convient de séparer les contributions diffuses et ponctuelles des flux observés à la charge globale du ruisseau. Rappelons en effet que les simulations de GÉODEP ne s'appliquent qu'aux superficies en culture. Bien que ces contributions diffuses contribuent généralement à la majeure partie des exportations de phosphore en bassin versant agricole, les contributions ponctuelles ne sont pas pour autant négligeables. En Montérégie, reflétant des occupations du sol comparables à celles du Ruisseau des Anges, celles-ci ont été estimées entre 5 et 14 % du flux global de P (Michaud et al., 2002; Madramootoo et al., 2012).

L'approche retenue dans l'approximation des contributions diffuses et ponctuelles aux exportations du bassin versant du Ruisseau des Anges consiste à associer les sources ponctuelles aux flux de P estimés dans la strate d'écoulement de base ($< 1,1$ mm/jr), alors que les sources diffuses sont associées à la strate de débit de crue. Cette procédure s'inspire des travaux de Dorioz et al. (1989) qui caractérise les sources de P exportés vers le cours d'eau sur la base de la progression des concentrations en fonction du débit du cours d'eau. En écoulement de base, l'augmentation du débit tend à diluer les apports ponctuels (pente C/Q négative), alors que les processus de transports diffus ne sont pas actifs. À l'inverse, la concentration en P tend à augmenter avec le débit lors des crues, reflétant une activité croissante du ruissellement de surface, du drainage souterrain et des transferts diffus en provenance des champs.

Le tableau 6 rapporte les séparations des flux de P et de MES suivant les stratifications des débits et des saisons décrite au tableau 3. Globalement, la charge annuelle de P associée à la strate de débit de base correspond à 18.5% de la charge totale de P, soit une charge annuelle moyenne de 636 kg P/ha-an). De la même façon, 16% de la charge totale annuelle en matières en suspension observée à l'exutoire du bassin versant est associée à l'écoulement de base du ruisseau, soit 187 T MES/an. Ces contributions seront ajoutées aux estimations de contributions diffuses simulées par GÉODEP pour les fins de la comparaison à l'échelle du bassin versant avec les charges observées pour la période 1991-1991. En ce qui a trait aux charges de sédiments et de nutriments provenant du milieu boisé, celles-ci sont considérées négligeables, dans le contexte de la présente étude.

3 RÉSULTATS

Les résultats de simulation d'eau ruisselée et drainée, de même que les taux d'exportation de P suivant la modélisation avec GÉODEP pour le scénario de référence et cumulés l'ensemble du bassin versant sont présentés au tableau 6. Le tableau 7 présente pour sa part la distribution dans les résultats d'hauteur de ruissellement, d'exportation de sédiments et de P prédits par type d'occupation du sol. Les figures 5 à 10 illustrent les mêmes résultats à l'échelle des 1,621

unités de réponse hydrologique pour l'ensemble du bassin versant, d'abord pour le scénario de référence, représentatif de l'occupation actuelle des sols, puis pour le scénario de gestion uniforme « Tout maïs ». L'ensemble de ces résultats sont inclus dans le SIG transmis en livrable au projet, et permettant de moduler à volonté les paramètres de régulation et d'aménagement des champs.

Le tableau 8 met en comparaison les résultats de la simulation GéODEP pour l'année de référence 2013 avec les flux évalués sur la base du suivi hydrométrique pour la période 1991-1996 à l'exutoire du bassin versant du Ruisseau des Anges. Dans l'ensemble, les flux prédits de sédiments et de phosphore sont cohérents avec les flux observés entre 1991 et 1996. Un taux moyen d'érosion légèrement à la hausse (457 kg MES/ha-an) prédit pour la période actuelle pourrait s'expliquer par une diminution significative des superficies en prairie par rapport aux années '90. À l'instar des autres régions agricoles du sud-ouest de la province, ces réductions de superficies en prairie ont généralement profité à l'accroissement des superficies en maïs-grain et en soya. L'accroissement des pertes de sol lié à l'intensification des cultures est cependant tempéré dans le scénario de référence GéODEP par la prise en compte de la culture sur résidus pour une superficie équivalente à la culture de soya. Il est par ailleurs admis que la superficie totale occupée aujourd'hui par les cultures dans le bassin versant est supérieure à celle occupée dans les années '90, contribuant ainsi à sous-estimer les charges spécifiques (kg/ha-an) de la période 1991-1996. Nous ne disposons malheureusement pas du portrait précis des plans de culture pour cette période historique.

En ce qui a trait aux simulations des pertes de phosphore, la charge spécifique annuelle moyenne de P attribuée par GéODEP aux superficies en culture est de l'ordre de 1,45 kg P/ha. Celle-ci est inférieure à la charge estimée pour les sources agricoles diffuses de 1991-1996, soit 1,35 kg P/ha-an. Une telle réduction peut surprendre, compte tenu de l'augmentation des superficies en cultures annuelles et du taux d'exportation de matières en suspension à la hausse en période actuelle. Les changements apportés aux pratiques de fertilisation des cultures, suivant la mise en place du Règlement sur les exploitations agricoles (REA) pourrait contribuer à expliquer un gradient à la baisse dans les exportations de P en période actuelle. La forte contribution des exportations solubles de P observées en 1991-1996 (67% du P total) militent pour cette hypothèse. Les flux prédits de P dissous par GéODEP constituent plutôt 38% du P total, considérant les taux modérés d'application d'engrais de ferme (20 à 40 kg P₂O₅/ha) retenus dans le scénario de référence

Tableau 7. Distribution des hauteurs d'eau et des exportations annuelles de sédiments et de phosphore à l'échelle des unités de réponse hydrologique et par classe d'occupation du sol résultant de la modélisation hydrologique GÉODEP à l'échelle du bassin versant du Ruisseau des Anges.

Culture	Ruissellement (mm/an)		Exportation de sédiments (kg)		Exportation de P total (kg P/ha)	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Foin	91.83	22.60	13.27	10.71	0.57	0.20
Mais	165.81	44.18	415.18	207.80	1.29	0.38
Maraicher	169.02	45.88	443.78	216.18	1.29	0.38
Mixte	156.34	44.70	262.59	114.55	1.09	0.46
Céréales à paille	137.02	21.31	208.97	126.97	1.00	0.45
Soya	144.97	30.70	558.99	237.28	1.56	0.31

Tableau 8. Comparaison des résultats de la simulation GÉODEP pour l'année de référence 2013 avec les flux évalués sur la base du suivi hydrométrique pour la période 1991-1996 à l'exutoire du bassin versant du Ruisseau des Anges.

Simulation GÉODEP (2013)	Sédiments	P total	P en solution	P particulaire
Charge totale annuelle du bassin versant (kg/an)	1 354 488	4 080	1 532	2 548
Charge diffuse annuelle du parcellaire en culture (kg/an)	1 167 859	3 444	1 328	2 116
Charge ponctuelle annuelle du parcellaire en culture (kg/an)	186 629	636	204	432
Charge totale annuelle spécifique du bassin versant (kg/ha) ¹	372	1,12	0,42	0,70
Charge diffuse annuelle spécifique du parcellaire en culture (kg/ha-an) ²	457	1,35	0,52	0,83
Evaluation FLUX (1991-1996)				
Charge totale annuelle du bassin versant (kg/an)	1 418 136	4 550	3 071	1 479
Charge diffuse annuelle du parcellaire en culture (kg/an)	1 191 512	3 710	2 599	1 111
Charge ponctuelle annuelle du parcellaire en culture (kg/an)	226 624	840	472	368
Charge totale annuelle spécifique du bassin versant (kg/ha) ¹	390	1,25	0,84	0,41
Charge diffuse annuelle spécifique du parcellaire en culture (kg/ha-an) ²	467	1,45	1,02	0,44
¹ Exprimée par rapport à la superficie totale du bassin versant (3,638 ha)				
² Exprimée par rapport à la superficie en culture de bassin en 2013 (2,553 ha)				

4 CONCLUSION

La présente étude a permis l'application de GÉODEP au bassin versant du Ruisseau des Anges. Il s'agissait d'une première application de l'outil à l'extérieur de la région où il a été développé, soit la région de Beauce-Appalaches. Aussi, l'étude démontre le caractère transférable de l'outil à référence spatiale pour la plupart des régions agricoles québécoises disposant des données géospatiales similaires, dont un modèle numérique de surface à haute résolution généré par LiDAR.

Dans l'ensemble les flux simulés par GÉODEP apparaissent réalistes, en comparaison des flux historiques de 1991-1996. Cette comparaison demeure cependant limitée par les changements intervenus depuis les vingt dernières années, dont l'accroissement global des superficies en culture, la baisse relative des superficies en prairie au profit des cultures annuelles, de même que les changements apportés aux pratiques de fertilisation induites par la mise en œuvre du REA. Rappelons par ailleurs que les scénarios de régie de culture, les richesses des sols et l'aménagement des terres retenus dans le scénario de référence pour les fins de la simulation GÉODEP n'ont pas profité de données colligées à l'échelle de la ferme. Aussi, les présentes simulations de flux doivent être considérées à titre indicatif, et dans une perspective à l'échelle du bassin versant. Des applications à l'échelle du champs devraient profiter d'une mise à jour de la base de données pour le parcellaire concerné, afin de refléter de façon plus précise la régie des sols et des cultures, l'aménagement des terres de même que la richesse actuelle des sols en phosphore.

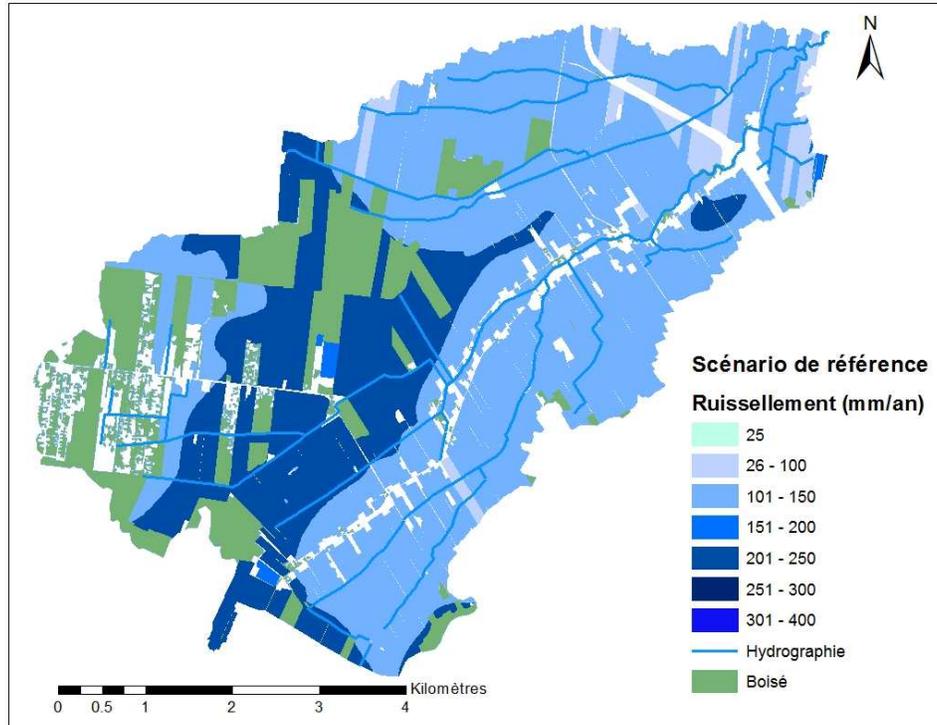


Figure 5 : Hauteur d'eau annuelle ruisselée exprimée à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion de référence.

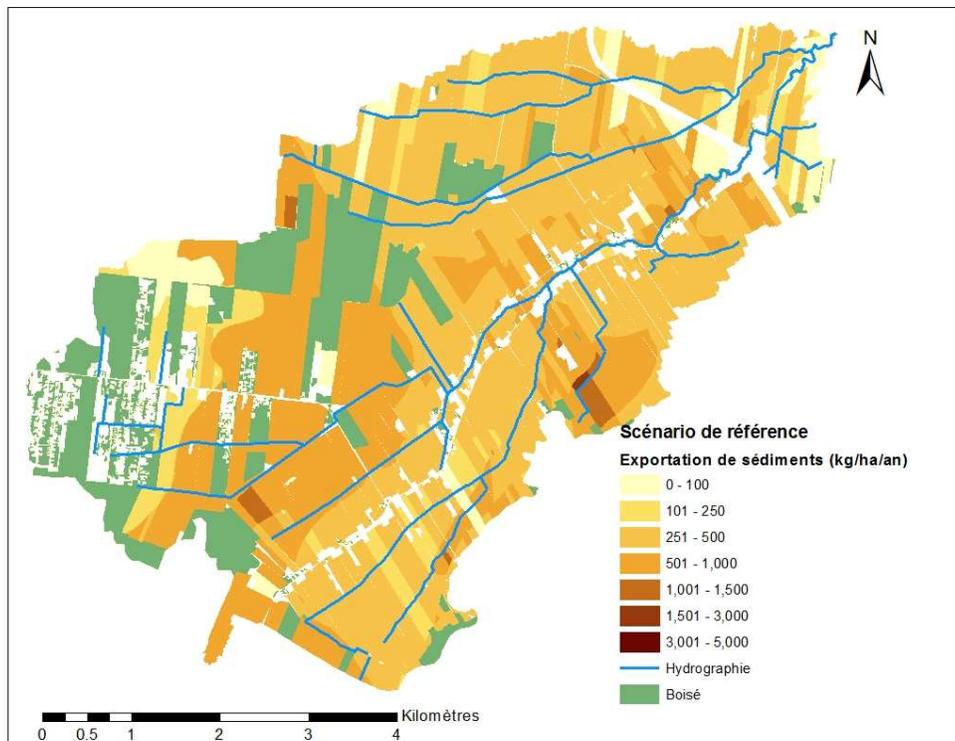


Figure 6 : Exportation annuelle de sédiment exprimée à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion de référence.

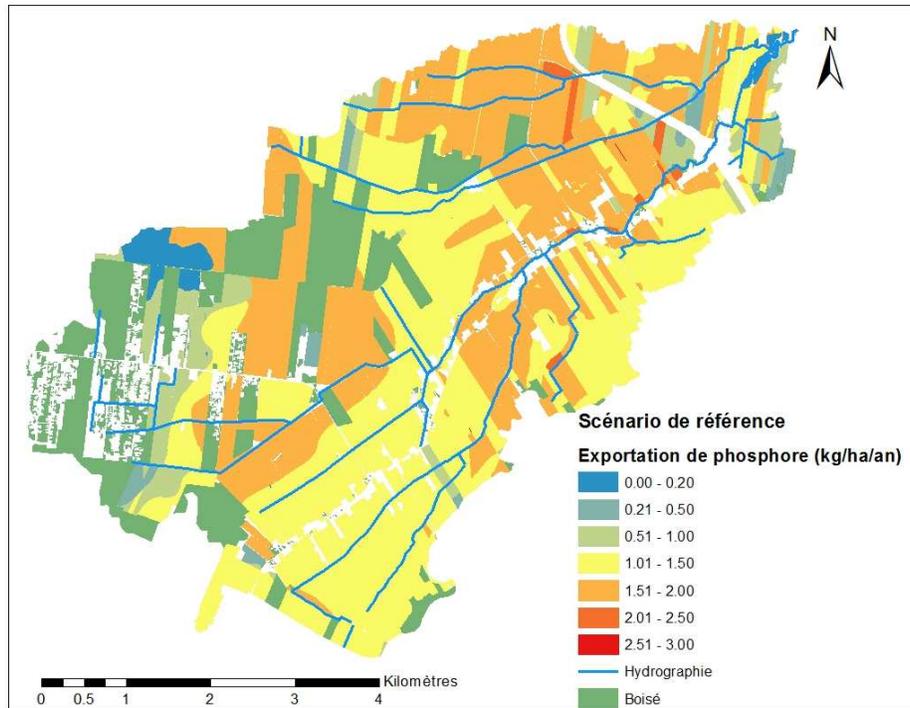


Figure 7 : Exportation annuelle de phosphore total exprimé à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion de référence.

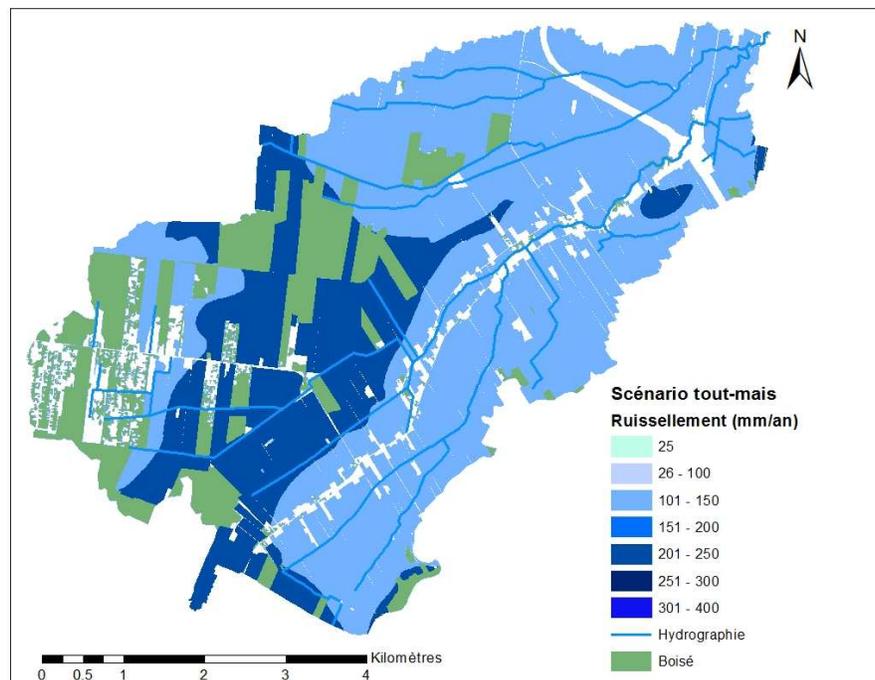


Figure 8 : Hauteur d'eau annuelle ruisselée exprimée à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion « tout maïs ».

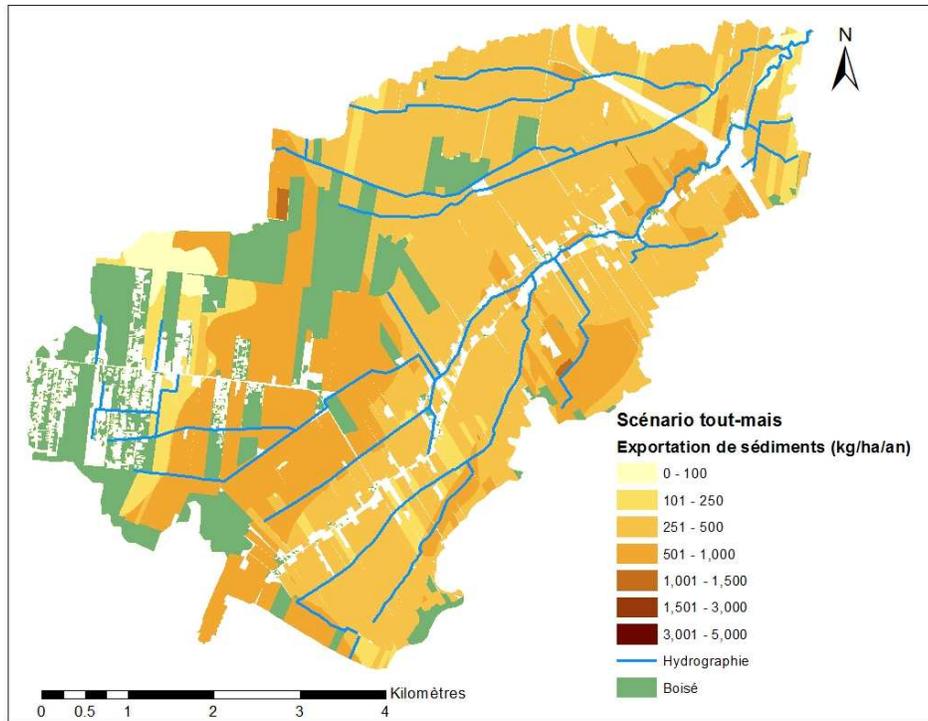


Figure 9 : Exportation annuelle de sédiments exprimée à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion « tout maïs ».

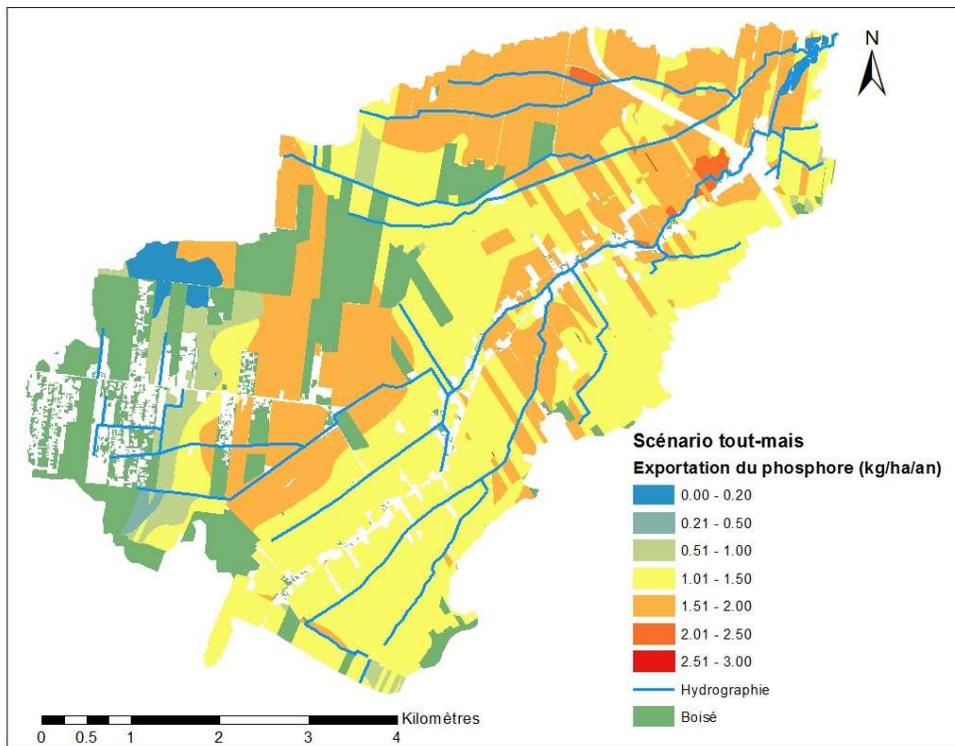


Figure 10 : Exportation annuelle de phosphore total exprimé à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique pour le scénario de gestion « Tout maïs ».

5 RÉFÉRENCES CITÉES

- Beudet, P., M. Grenier, M. Giroux, V. Girard. 2009. Base de données sur les statistiques des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec.
- Drouin, A., I. Beaudin et A. Michaud. 2014a. GEODEP : l'outil de diagnostic des exportations de phosphore spatialisé. Fiche synthèse, IRDA. 2 p. <http://www.irda.qc.ca/fr/publications/geodep-l-outil-de-diagnostic-des-exportations-de-phosphore-spatialise/>
- Drouin, A., I. Beaudin, J. Desjardins, A.R. Michaud et N. Côté. 2013. GEODEP : l'outil de diagnostic des exportations de phosphore spatialisé – Contenu et fonctionnement. IRDA. 36 p.
- Madramootoo, C. A., A. R. Michaud, J. Whalen et S.-C. Poirier. 2012. Mesures précises et approches innovantes en modélisation de la dynamique des nutriments en bassin et en plan d'eau contribuant aux fleurs des cyanobactéries. Rapport final n° 2009-CY-130646. Programme de recherche en partenariat sur les cyanobactéries. Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies et Fonds de la recherche en santé du Québec. 30 p.
- Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2002. Description du système de transfert du phosphore dans le bassin versant du ruisseau au Castor. Agrosol 13(2): 124-139.
- Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beudet et J. Lagacé. 2009g. ODEP; un Outil de diagnostic des exportations de phosphore. Projet « Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec », réalisé dans le cadre de l'Initiative d'appui aux conseillers agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada. 107 pages et annexes.
http://www.irda.qc.ca/ftbFiles/Nouvelles/ODEP_Manuel_utilisateur2009.pdf
<http://www.irda.qc.ca/services/type/1.html>
- Walker, W. 1998. Flux, Stream loads computations, version 5.0. Environmental laboratory USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi, USA.