

RAPPORT FINAL

OBSERVATOIRE DE LA QUALITÉ DE
L'EAU DE SURFACE EN BASSINS
VERSANTS AGRICOLES

RÉSEAU BAIE DE LAVALLIÈRE,
MONTÉRÉGIE





Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

Rapport de
L'Observatoire de la qualité de l'eau de surface
en bassins versants agricoles :
Portrait du bassin de la Baie de Lavallière
en période d'évaluation 2013-2014

Par

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

Dans le cadre de
L'Observatoire de la qualité de l'eau de surface
en bassins versants agricoles

Avec le soutien financier du Ministère de l'agriculture, de pêcheries et de
l'alimentation du Québec APAQ

Québec, septembre 2016

Équipe de réalisation :

Aubert Michaud, Jacques Desjardins, Mireille Dubuc, Ariane Drouin, Michèle Grenier,
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.

Le rapport peut être cité comme suit :

Michaud, A.R., J. Desjardins, M. Dubuc, A. Drouin, M. Grenier. 2016. Rapport final de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles pour le réseau d'étude de la Baie Lavallière, en Montérégie. Rapport de recherche. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada. 51 pages plus annexes.

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.



www.irda.qc.ca

Pour nous rejoindre :

IRDA
Québec
Centre de recherche
2700, rue Einstein
Québec (Québec)
G1P 3W8 CANADA
Tél. : 418 643-2380
Télec. : 418 644-6855

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 (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et le ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE).

Avant-propos

Ce document offre une synthèse des suivis hydrométriques et des actions agroenvironnementales entreprises dans les deux micro-bassins versants de l'*Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles* du réseau d'étude de la Baie Lavallière pour la période 2009-2014.

Les activités de recherche-action coordonnées par l'IRDA et financées par le MAPAQ avec la participation des comités locaux de bassins versants s'inscrivent dans le *Plan d'intervention agroenvironnemental sur les algues bleu-vert du gouvernement du Québec (2007-2017)* et le *Plan d'intervention agroenvironnementale sur les algues bleu-vert (ZIPP- Zones d'intervention prioritaires sur le Phosphore)*. Grâce aux dispositifs expérimentaux de l'*Observatoire*, le développement de connaissances spécifiques aux transferts diffus de sédiments, de nutriments et de microorganismes pathogènes vers les eaux de surface appuie les actions concertées des communautés rurales dans la mise en valeur de leurs bassins versants.

Table des matières

Avant-propos.....	3
Table des matières.....	4
Liste des tableaux.....	5
Liste des figures.....	6
1 Introduction.....	8
2 Méthodologie.....	9
2.1 Sites d'étude.....	9
2.2 Dispositifs et protocoles expérimentaux.....	19
3 Résultats.....	29
3.1 Problématique et action agroenvironnementale dans le bassin versant de la Baie Lavallière.....	29
3.2 Suivi hydrologique 2013-2014.....	33
4 Conclusion.....	48
5 Références citées.....	50
Annexe 1. Diagnostic de l'état des rives de la 3 ^e Petite rivière Pot-au-Beurre, bassin Intervention du réseau Lavallière de l' <i>Observatoire</i>	53

Liste des tableaux

Tableau 1. Superficie des bassins expérimentaux de l' <i>Observatoire</i> de la Baie Lavallière.....	9
Tableau 2. Élévations et pentes dans les bassins expérimentaux de la Baie Lavallière.....	13
Tableau 3. Série, texture et qualité du drainage des sols des bassins expérimentaux de la Petite rivière Bellevue et de la 3 ^e Petite rivière Pot-au-Beurre.....	15
Tableau 4. Occupation et utilisation du territoire des bassins jumeaux de la Baie Lavallière.	17
Tableau 5. Synthèse des activités d'entretien et de mesures aux stations de l' <i>Observatoire</i> dans le réseau de la Baie de Lavallière pour la période d'avril 2013 à novembre 2014.....	21
Tableau 6. Synthèse du nombre et du type d'analyses physico-chimiques et bactériologiques effectuées aux stations de l' <i>Observatoire</i> dans le réseau de la Baie de Lavallière.	21
Tableau 7. Stratification des écoulements de base et de crue pour la période d'évaluation du 1 ^{er} avril 2013 au 2 octobre 2014 de la PRB et de la 3ePRPB.....	36
Tableau 8. Précipitations et écoulement souterrain en période de référence et en période d'évaluation dans le bassin de la PRB et de la 3ePRPB.....	37
Tableau 9. Charges et concentrations moyennes pondérées pour le débit de matières en suspension observées aux exutoires des bassins 3 ^e Petite rivière Pot-au-Beurre et Petite rivière Bellevue au moyen des sondes multi-paramètres pour la période de référence 2009-2011 et la période d'évaluation 2013-2014.	37
Tableau 10. Résultats de l'analyse de covariance de l'effet de la période (Référence 2009-2011 vs évaluation 2013-2014) sur le débit et le flux hebdomadaire de la matière en suspension (sonde de turbidité) du ruisseau Intervention (3e Petite Rivière Pot-au-Beurre), utilisant les observations appariées du bassin témoin (Petite Rivière Bellevue) en covariable.....	40
Tableau 11. Concentrations moyennes pondérées pour le débit et charges spécifiques de phosphore, d'azote et de calcium estimées aux exutoires des bassins de la Petite rivière Bellevue et de la 3e Petite rivière Pot-au-Beurre en période de référence (2009-2011), et d'évaluation (2013-2014).....	41
Tableau 12. Résultats de l'analyse de covariance de l'effet de la période (Référence 2009-2011 vs évaluation 2013-2014) sur le débit de même que les concentrations et les flux instantanés de MES, phosphore, nitrates et calcium observés au bassin Intervention (3 ^e Petite Rivière Pot-au-Beurre) utilisant les observations appariées du bassin témoin (Petite Rivière Bellevue) en covariable.	44

Liste des figures

Figure 1. Localisation des bassins versants expérimentaux.	10
Figure 2. Sols du bassin de la Petite rivière Bellevue.	11
Figure 3. Sols du bassin de la 3 ^e Petite rivière Pot-au-Beurre.	12
Figure 4. Paysages du bassin versant de la Petite rivière Bellevue (a) et de la 3 ^e Petite rivière Pot-au-Beurre (b).	13
Figure 5. Utilisation du territoire du bassin de la 3 ^e Petite rivière Bellevue.	14
Figure 6. Utilisation du territoire du bassin de la 3 ^e Petite rivière Pot-au-Beurre.	18
Figure 7. Le limnimètre et la sonde acoustique installés dans la 3ePRPB permettent la mesure en continu du niveau d'eau et de la vitesse du courant toute l'année.	19
Figure 8. La sonde multi-paramètres (vue rapprochée) installée avec un dispositif de flottaison dans le tube de plastique perforé de pvc (en noir).	20
Figure 9. Dispositif d'alimentation solaire et d'enregistrement électronique des mesures provenant des sondes, installé sur la rive de la 3ePRPB.	20
Figure 10. Mesure du débit à l'aide du moulinet hydrométrique.	21
Figure 11. Schéma du traitement des données du suivi hydrologique des micro-bassins de l'Observatoire dans le réseau de la Baie de Lavallière.	22
Figure 12. Exemple de variation de la turbidité et de la conductivité électrique en lien avec le débit sur 24 h. (Évènement du 18 au 20 novembre 2013, 3ePRPB).	24
Figure 13. Fluctuation sur 24 h de la turbidité et de la conductivité électrique en fonction de la hauteur d'eau exportée (Évènement du 18 au 20 novembre 2013, 3ePRPB).	25
Figure 14. Valeurs de la puissance hydraulique spécifique et état des berges pour les sites visités du bassin Intervention de l'Observatoire (3ePRPB), adapté de Roux (2012).	31
Figure 15. Séries chronologiques des débits spécifiques (ruissellement et écoulement souterrain) et des précipitations journalières observées aux stations de la PRB et de la 3ePRPB.	35
Figure 16. Séries chronologiques des concentrations instantanées (15 minutes) en matières en suspension (MES) et des débits spécifiques observés aux stations de la 3ePRPB et PRB du réseau Lavallière pour la période d'évaluation 2013-2014.	38
Figure 17. Comparaison des flux hebdomadaires de matières en suspension entre le bassin témoin (petite rivière Bellevue) et le bassin intervention (3 ^e Petite rivière Pot-au-Beurre) de la Baie de Lavallière dérivés des sondages en continu de la turbidité.	39
Figure 18. Analyse de covariance de l'effet de la période (référence 2009-2011 vs Évaluation 2013-2014) sur la hauteur d'eau et le flux de sédiments hebdomadaires du ruisseau de la 3e Petite Rivière Pot-au-Beurre (bassin Intervention), utilisant les observations de la Petite Rivière Bellevue en covariable.	40
Figure 19. Concentrations instantanées observées en P total, P total dissous, nitrates et calcium en fonction de la date d'échantillonnage et du débit spécifique à la station de la	

Petite-Rivière-Bellevue pour la période d'évaluation 2013-2014 et la période de référence 2009-2011	42
Figure 20. Concentrations instantanées observées en P total, P total dissous, nitrates et calcium en fonction de la date d'échantillonnage et du débit spécifique à la station de la 3e Petite Rivière-Pot-au-Beurre pour la période d'évaluation 2013-2014 et la période de référence 2009-2011.....	43
Figure 21. Analyse de covariance de l'effet de la période (référence 2009-2011 vs Évaluation 2013-2014) sur les flux instantanés de MES, P total, nitrates et calcium du bassin de la 3e Petite-Rivière-Pot-au-Beurre (bassin Intervention), utilisant les observations du bassin de la Petite-Rivière-Bellevue en covariable.....	45
Figure 22. Séries chronologiques des flux hebdomadaires de MES, phosphore total, nitrates et calcium estimés aux stations de la 3e Petite Rivière- Pot-au-Beurre et de la Petite-Rivière-Bellevue du réseau Lavallière pour la période d'évaluation 2013-2014.....	46

1 INTRODUCTION

Ce rapport de recherche fait état des résultats obtenus dans le cadre du réseau de la Baie Lavallière de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles couvrant la période de mai 2009 à octobre 2014. Suivant un dispositif d'étude en bassins jumeaux, la démarche de suivi hydrologique retenue pour l'*Observatoire* est adaptée à la détection de réponses de la qualité de l'eau dans le temps aux actions agroenvironnementales entreprises dans le micro-bassin Intervention du réseau (3^e Petite rivière Pot-au-Beurre) en utilisant les observations colligées à l'exutoire du micro-bassin Témoin (Petite rivière Bellevue) à titre de balise. Trois étapes ont jalonné le déroulement du projet:

- La période de référence (2009-2011) a permis la description des écoulements et de la qualité de l'eau à l'exutoire de chacun des bassins versants expérimentaux en lien avec les caractéristiques physiographiques, l'occupation du territoire et les systèmes de production agricole. Des relations significatives dans les régimes d'exportations de sédiments et de nutriments entre les bassins jumeaux ont également été établies, de façon à servir de balises dans la détection future de changements en réponse aux actions agroenvironnementales concertées dans le bassin *Intervention*.
- La période d'intervention, initiée en 2012, a été dédiée à la mise en œuvre d'actions concrètes de conservation des sols et de l'eau dans un des bassins jumeaux: le bassin *Intervention*.
- La reprise en 2013 du suivi de la qualité de l'eau aux exutoires des deux micro-bassins jumeaux avait pour objectif de détecter et de quantifier la réponse de la qualité de l'eau aux actions concertées dans le bassin *Intervention*. Les différences dans les exportations de sédiments et de nutriments des deux micro-bassins en période d'évaluation (2013-2014) sont alors comparées à celles de la période de référence afin de quantifier, de façon relative, le changement dans les taux d'exportation.

La première partie de ce document présente une description des micro-bassins à l'étude de même que la méthodologie employée dans le suivi et l'analyse de leur comportement hydrologique. En deuxième partie, les résultats des suivis hydrologiques des deux micro-bassins sont exposés, précédés d'une description de la problématique agroenvironnementale propre au bassin *Intervention*, de même que d'un bilan des actions agroenvironnementales entreprises par les différents acteurs régionaux en collaboration avec l'équipe de l'IRDA.

2 MÉTHODOLOGIE

Les dispositifs et protocoles expérimentaux mis en œuvre dans le réseau de l'*Observatoire* découlent d'expertises développées par l'équipe *Bassins versants* de l'IRDA dans le cadre de projets antérieurs dans diverses régions agricoles du Québec (Michaud et al., 2005; Michaud et al., 2009a; Michaud et al., 2009b). Ces projets ont permis une meilleure compréhension de la dynamique des transferts diffus de sédiments, des nutriments et microbes pathogènes vers les écosystèmes aquatiques en milieu agricole. Ils ont également permis de valider une approche d'évaluation des retombées environnementales d'actions concertées d'entreprises agricoles à l'échelle du bassin versant. Pour de plus amples informations sur l'application de ces dispositifs et protocoles expérimentaux, le lecteur est invité à consulter ces rapports de recherche, de même que le rapport de la période de référence 2009-2011 de l'*Observatoire* (Michaud et al., 2012a).

2.1 Sites d'étude

Tel qu'illustré à la figure 1, la paire de bassins versants jumeaux de l'*Observatoire* est située dans la région de la Montérégie-Est. Les sous-bassins versants sélectionnés couvrent entre 16 et 20 km² (Tableau 1) et font partie du bassin versant de la Baie Lavallière, qui s'écoule à proximité de l'embouchure de la rivière Yamaska. Les deux bassins expérimentaux sont situés dans la MRC Pierre-de-Saurel. Le bassin de la Petite rivière Bellevue (PRB), retenu comme bassin Témoin, occupe principalement la partie Est de la municipalité de Sainte-Victoire-de-Sorel, alors que le bassin de la 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre (3ePRPB), retenu comme bassin Intervention, traverse la municipalité de Saint-Robert en empiétant un peu sur la municipalité de Saint-Aimé au sud, et sur celle de Yamaska au nord (Figures 2 et 3).

Tableau 1. Superficie des bassins expérimentaux de l'*Observatoire* de la Baie Lavallière.

Région	ZIPP ou PAC	Sous bassin expérimental*	Superficie (ha)
Montérégie-Est	Baie de Lavallière	Petite rivière Bellevue (T) PRB	1 613,2
		Petite rivière Pot-au-Beurre (I) 3ePRPB	2 009,9

*T= Bassin *Témoin* I=Bassin *Intervention*

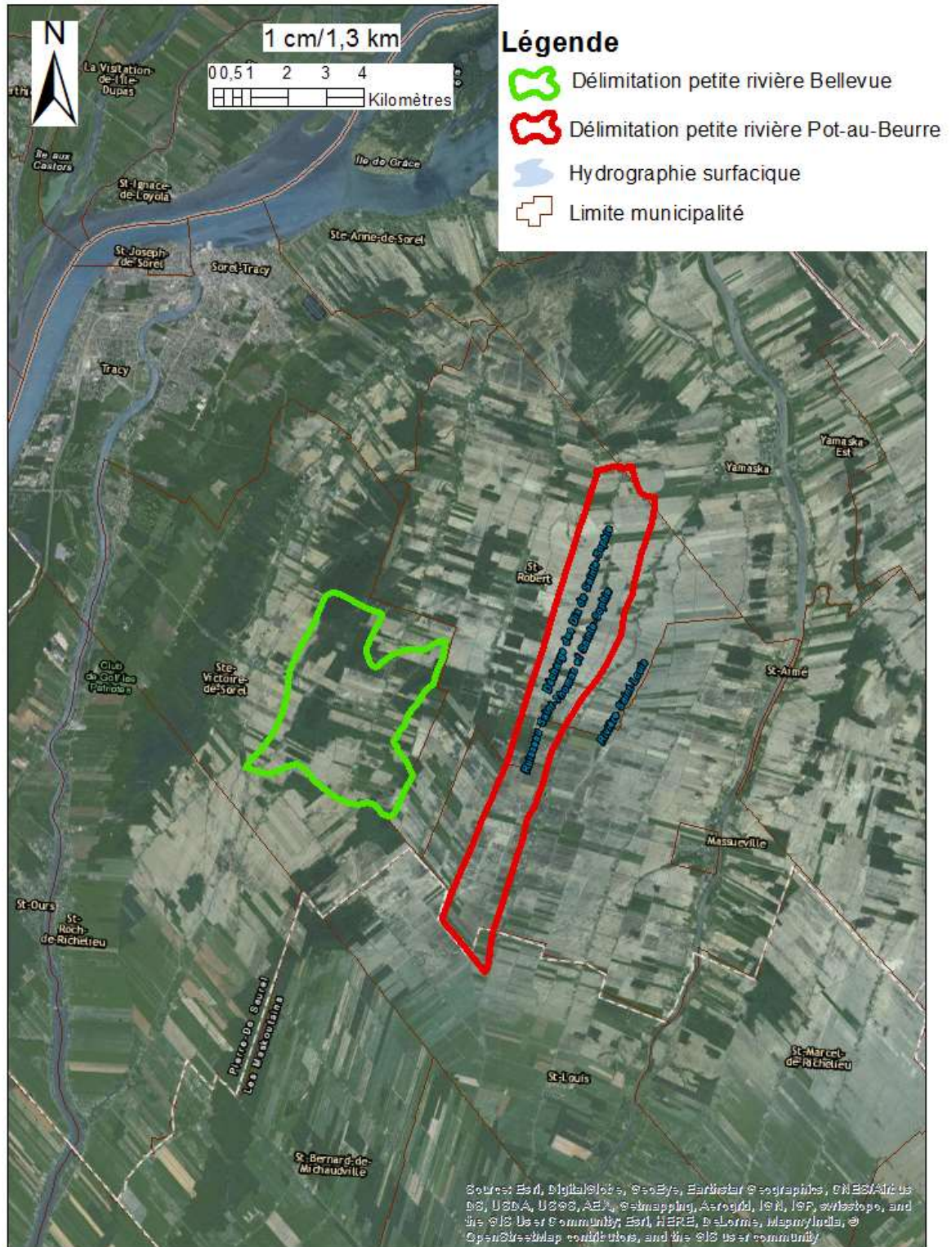


Figure 1. Localisation des bassins versants expérimentaux.

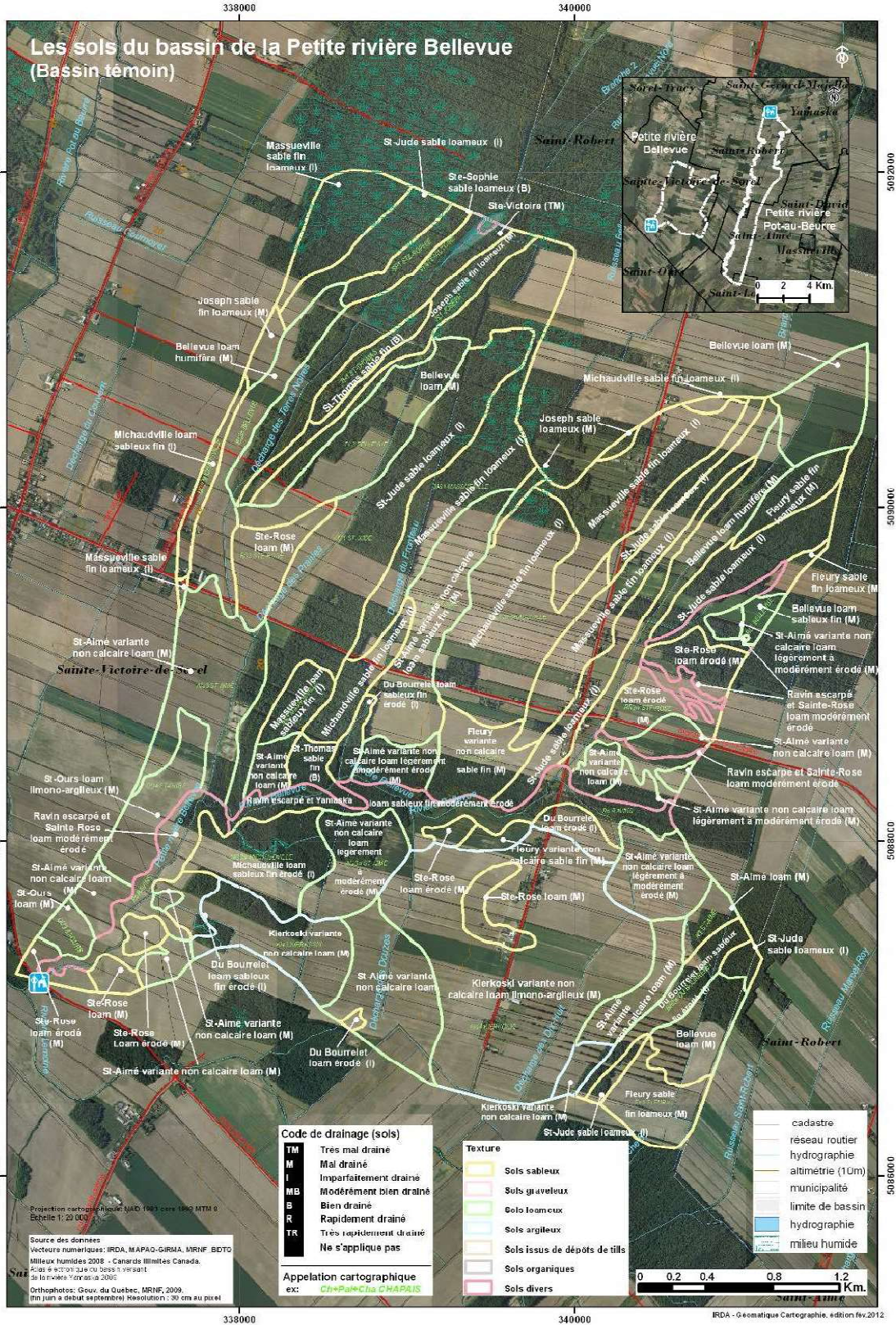


Figure 2. Sols du bassin de la Petite rivière Bellevue.

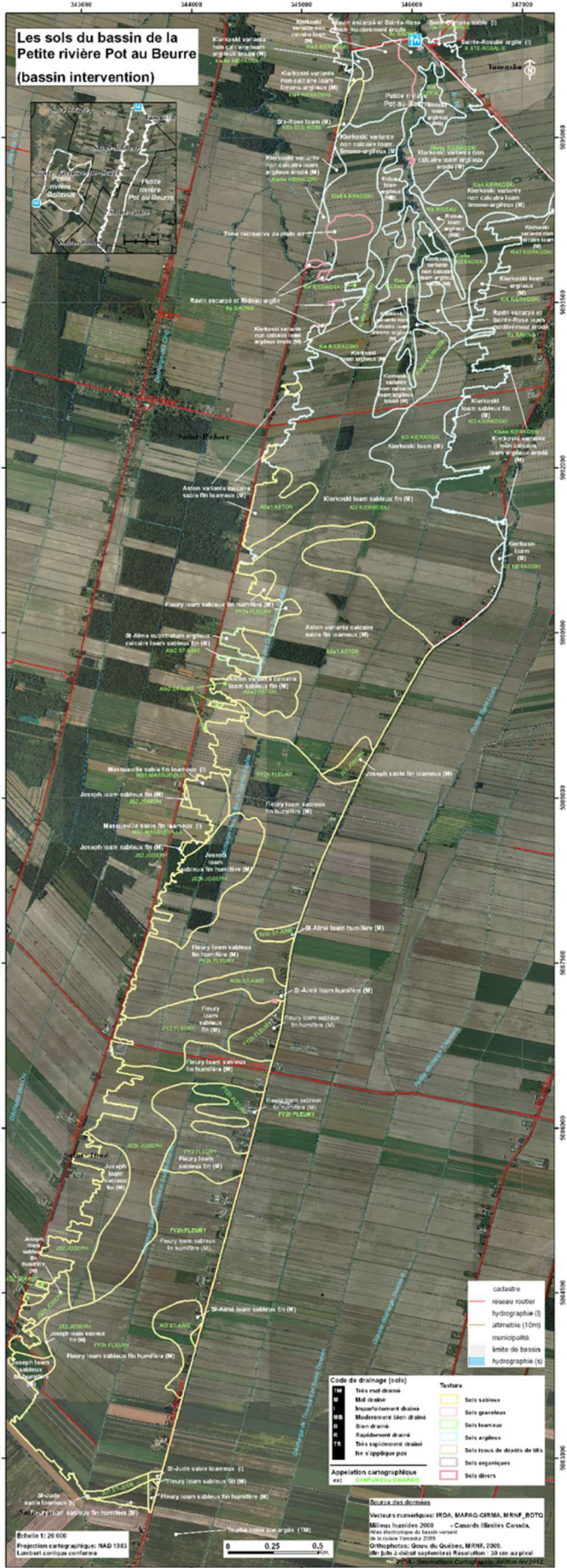


Figure 3. Sols du bassin de la 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre.



Figure 4. Paysages du bassin versant de la Petite rivière Bellevue (a) et de la 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre (b).

Tableau 2. Élévations et pentes dans les bassins expérimentaux de la Baie Lavallière.

Territoire concerné	<i>Témoin</i>			<i>Intervention</i>		
	Petite rivière Bellevue			3 ^e Petite rivière Pot-au-beurre		
	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
Élévation (m)						
Totalité du bassin	15	25	20,45	15	28	22,65
Zone agricole*	15	25	20,38	15	28	22,65
Pentes (%)						
Totalité du bassin	0	5,38	0,67	0	8,84	0,65
Zone agricole*	0	4,76	0,67	0	7,5	0,65

* Zone agricole telle que définie par la Banque de données des cultures assurées (BDCA) de la Financière Agricole du Québec.

Source : Statistiques établies à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) des Données numériques d'élévation du Canada (DNEC) de Ressources naturelles Canada (1:50 000).

Tel qu'en témoignent les pentes moyennes des bassins à l'étude inférieures à 0,7% (Tableau 2), le paysage des bassins expérimentaux est particulièrement plat (Figure 4). Les textures de sol présentent un gradient Nord-Sud, où les textures grossières de sol dominant en amont des bassins versants, alors que les textures plus lourdes sont davantage présentes en aval. La texture de sable fin loameux occupe la plus grande superficie dans le bassin PRB (*Témoin*), alors que la texture de loam limono-argileux domine dans le bassin 3ePRPB (*Intervention*). Les loams sableux sont également bien présents dans les deux bassins (Tableau 3).

La forêt couvre 37 % du bassin PRB, alors que 62 % de sa superficie est en culture. Dans le bassin 3^e PRPB, la forêt occupe à peine 3 % du territoire, le reste de la superficie étant dédié aux cultures (Tableau 4). La culture de maïs domine dans la zone cultivée, en occupant respectivement plus de 42 % et près de 58 % des terres en cultures des bassins PRB et 3ePRPB, respectivement. Le soya vient en deuxième position (24 % et 12 %), puis les céréales (6,6 % pour les deux bassins). L'importance relative des superficies en prairie, en proportion des terres cultivées, est deux fois plus importante dans le bassin PRB que le bassin 3ePRPB. Les prairies couvrent ainsi jusqu'à 30% de la superficie en culture dans le bassin PRB, sur la base des données de La Financière Agricole du Québec cumulant les superficies en foin, des champs assurés en culture inconnue et des autres cultures (Tableau

4). Suivant le même calcul, la prairie couvre jusqu'à 13% de la superficie du bassin 3ePRPB. Les Figures 5 et 6 illustrent la distribution des cultures dans les deux bassins à l'étude pour l'année de référence 2013.

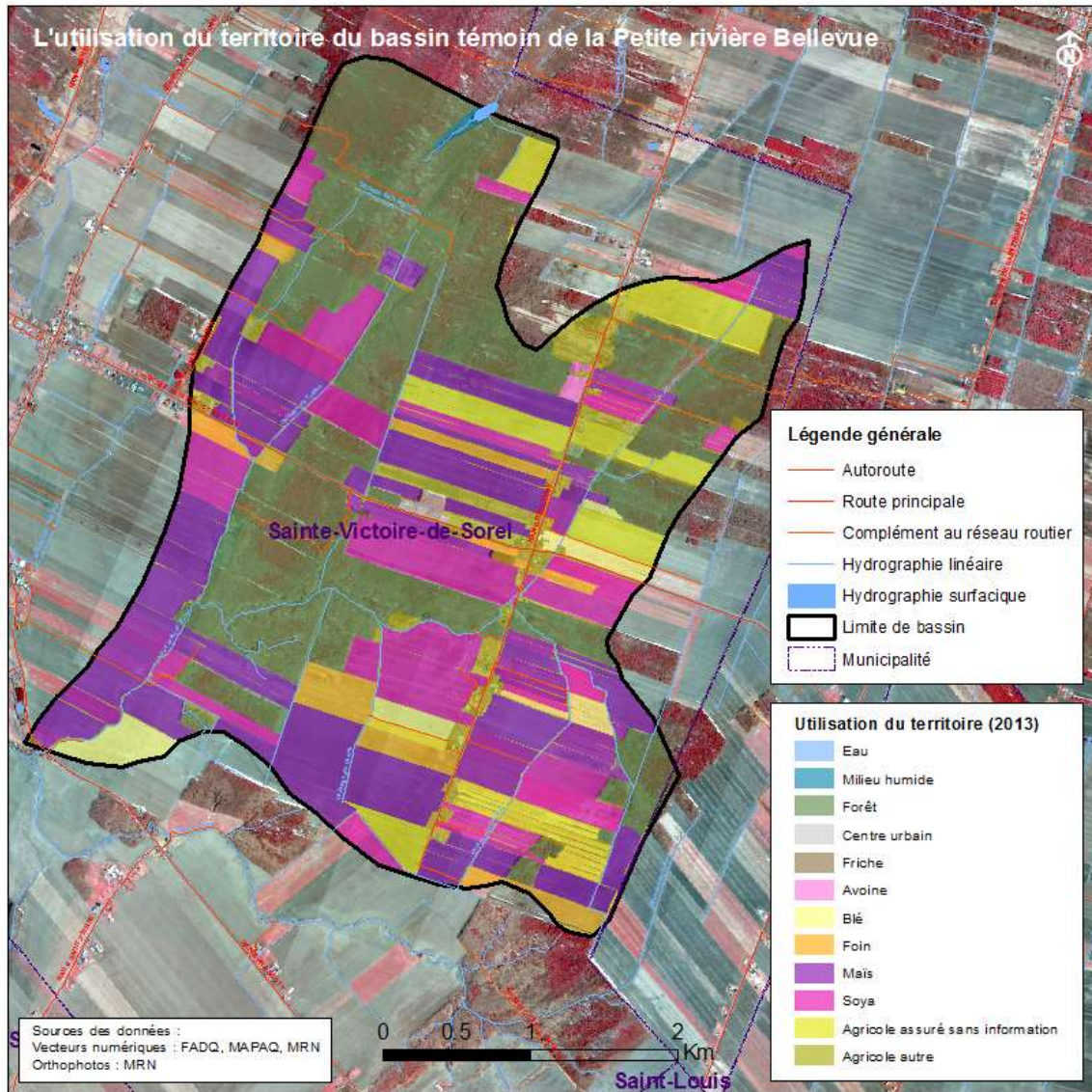


Figure 5. Utilisation du territoire du bassin de la 3^e Petite rivière Bellevue.

Tableau 3. Série, texture et qualité du drainage des sols des bassins expérimentaux de la Petite rivière Bellevue et de la 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre.

a. 3^e Petite rivière Bellevue

Matériel parental	Série de sol de la Petite rivière Bellevue	Texture	Drainage	ha	%
Sols argileux	Kierkoski variante non calcaire loam limono-argileux	Loam limono-argileux	Mal drainé	161,36	10,0
Sols argileux	Kierkoski variante non calcaire loam	Loam	Mal drainé	40,17	2,49
Sols loameux	Bellevue loam	Loam	Mal drainé	92,1	5,71
Sols loameux	Bellevue loam humifère	Loam	Mal drainé	68,8	4,26
Sols loameux	Bellevue loam sableux fin	Loam	Mal drainé	4,47	0,28
Sols loameux	Saint-Aimé loam	Loam sableux fin	Mal drainé	7,47	0,46
Sols loameux	Saint-Aimé variante non calcaire loam	Loam sableux fin	Mal drainé	149,11	9,24
Sols loameux	Saint-Aimé variante non calcaire loam légèrement à modérément érodé	Loam sableux fin	Mal drainé	76,41	4,74
Sols loameux	Saint-Aimé variante non calcaire loam sableux fin	Loam sableux fin	Mal drainé	46,83	2,90
Sols loameux	St-Ours loam	Loam	Mal drainé	7,07	0,44
Sols loameux	St-Ours loam limono-argileux	Loam limono-argileux	Mal drainé	25,52	1,58
Sols organiques	Ste-Victoire	Organique	Très mal drainé	45,52	2,82
Sols sableux	Massueville loam sableux fin	Loam sableux fin	Imparfaitement drainé	11,73	0,73
Sols sableux	Massueville sable fin loameux	Sable fin loameux	Imparfaitement drainé	203,74	12,6
Sols sableux	Fleury sable fin loameux	Sable fin loameux	Mal drainé	39,33	2,44
Sols sableux	Fleury loam sableux fin humifère	Loam sableux fin	Mal drainé	0,61	0,04
Sols sableux	Fleury variante non calcaire sable fin	Sable fin	Mal drainé	28,51	1,77
Sols sableux	St-Jude sable loameux	Sable loameux	Imparfaitement drainé	201,36	12,48
Sols sableux	Joseph loam sableux fin	Loam sableux fin	Mal drainé	0,35	0,02
Sols sableux	Joseph sable fin loameux	Sable fin loameux	Mal drainé	27,19	1,69
Sols sableux	Ste-Sophie sable loameux	Sable loameux	Bien drainé	11,54	0,72
Sols sableux	Michaudeville sable fin loameux	Sable fin loameux	Imparfaitement drainé	93,86	5,82
Sols sableux	Michaudeville loam sableux fin	Loam sableux fin	Imparfaitement drainé	8,75	0,54
Sols sableux	Michaudeville loam sableux fin érodé	Loam sableux fin	Imparfaitement drainé	34,58	2,14
Sols sableux	St-Thomas sable fin	Sable fin	Bien drainé	19,62	1,22
Sols sableux	Ste-Rose loam	Loam	Mal drainé	35,02	2,17
Sols sableux	Ste-Rose loam érodé	Loam	Mal drainé	42,46	76,2
Sols sableux	Du Bourrelet loam érodé	Loam	Imparfaitement drainé	9,84	0,61
Sols sableux	Du Bourrelet loam sableux fin érodé	Loam sableux fin	Imparfaitement drainé	32,03	1,99
Sols divers	Étendue d'eau	Ne s'applique pas		0,59	1,39
Sols divers	Ravin escarpé et Sainte-Rose loam modérément érodé	Ne s'applique pas		44,74	2,77
Sols divers	Ravin escarpé et Yamaska loam sableux fin modérément érodé	Ne s'applique pas		42,47	2,63

b. 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre

Matériel parental	Série de sol de la Petite rivière Pot-au-Beurre	Texture	Drainage	ha	%
Sols argileux	Kierkoski loam	Loam	Mal drainé	67,74	3,37
Sols argileux	Kierkoski loam argileux	Loam argileux	Mal drainé	60,36	3,00
Sols argileux	Kierkoski loam sableux fin	Loam sableux fin	Mal drainé	266,38	13,25
Sols argileux	Kierkoski variante non calcaire loam argileux érodé	Loam argileux	Mal drainé	130,58	6,50
Sols argileux	Kierkoski variante non calcaire loam limono-argileux	Loam limono-argileux	Mal drainé	119,93	5,97
Sols argileux	Kierkoski variante non calcaire loam	Loam	Mal drainé	31,43	1,56
Sols argileux	Rideau loam argileux	Loam argileux	Modérément bien drainé	48,55	2,42
Sols argileux	Sainte-Rosalie argile	Argile	Imparfaitement drainé	7,82	0,39
Sols loameux	Saint-Aimé loam humifère	Loam	Mal drainé	20,14	1,00
Sols loameux	Saint-Aimé loam sableux fin	Loam sableux fin	Mal drainé	18,36	0,91
Sols loameux	Saint-Aimé substratum argileux calcaire loam sableux fin	Loam sableux fin	Mal drainé	7,53	0,37
Sols sableux	Saint-Damase sable	Sable	Imparfaitement drainé	0,08	0,00
Sols sableux	Aston variante calcaire loam sableux fin	Loam sableux fin	Mal drainé	22,44	1,12
Sols sableux	Aston variante calcaire sable fin loameux	Sable fin loameux	Mal drainé	236,29	11,76
Sols sableux	Fleury loam sableux fin	Loam sableux fin	Mal drainé	103,33	5,14
Sols sableux	Fleury loam sableux fin humifère	Loam sableux fin	Mal drainé	541,04	26,92
Sols sableux	Massueville sable fin loameux	Sable fin loameux	Imparfaitement drainé	15,59	0,78
Sols sableux	St-Jude sable loameux	Sable loameux	Imparfaitement drainé	5,26	0,26
Sols sableux	Joseph loam sableux fin	Loam sableux fin	Mal drainé	51,35	2,55
Sols sableux	Joseph loam sableux fin humifère	Loam sableux fin	Mal drainé	185,88	9,25
Sols sableux	Joseph sable fin loameux	Sable fin loameux	Mal drainé	9,06	0,45
Sols sableux	Ste-Rose loam	Loam	Mal drainé	4,93	0,25
Sols divers	Étendue d'eau	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas	0,3	0,01
Sols divers	Ravin escarpé et Rideau argile	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas	2,7	0,13
Sols divers	Ravin escarpé et Sainte-Rose loam modérément érodé	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas	45,28	2,25
Sols divers	Zone récréative de plein air	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas	7,52	0,37
Sols argileux	Kierkoski loam	Loam	Mal drainé	67,74	3,37

Tableau 4. Occupation et utilisation du territoire des bassins jumeaux de la Baie Lavallière.

Bassins expérimentaux de la Baie Lavallière	<i>Témoïn</i>			<i>Intervention</i>		
	Petite rivière Bellevue			3 ^e Petite rivière Pot-au-beurre		
	ha	% du total	% de la zone agricole	ha	% du total	% de la zone agricole
Eau	0,59	0,04		0,18	0,01	
Milieu humide	2,81	0,17		<i>np</i>	<i>np</i>	
Forêt	596,44	36,97		50,92	2,70	
Friche	3,56	0,22		<i>np</i>	<i>np</i>	
Centre urbain	3,82	0,24		<i>np</i>	<i>np</i>	
En culture	1006 ha, 62 % du total			1 959 ha, 97 % du total		
Foin	58,46	3,62	5,81	63,24	3,14	3,23
Avoine	3,18	0,2	0,32	6,05	0,3	0,31
Blé	40,5	2,51	4,03	69,25	3,45	3,54
Orge	20,79	1,29	2,2	10	0,5	0,51
Autres céréales	<i>np</i>	<i>np</i>	<i>np</i>	44,44	2,21	2,27
Maïs	424	26,28	42,15	1128,96	56,17	57,63
Soya	236,93	14,69	23,55	241,39	12,01	12,32
Maraîchage	<i>np</i>	<i>np</i>	<i>np</i>	93,93	4,67	4,8
Cultures mixtes	<i>np</i>	<i>np</i>	<i>np</i>	19,08	0,95	0,97
Champs assurés (culture inconnue)	121,73	7,54	12,1	92,08	4,58	4,7
Autre*	121,12	7,51	12,04	182,39	9,07	9,31
Superficie totale du bassin	1 613,16	100	100	2 009,93	100	100

* Superficie agricole pouvant inclure champs non assurés, bâtiments, fossés, etc.

Sources : BDCA, 2013 (Financière agricole du Québec) et carte écoforestière (Ministère des Ressources naturelles du Québec).

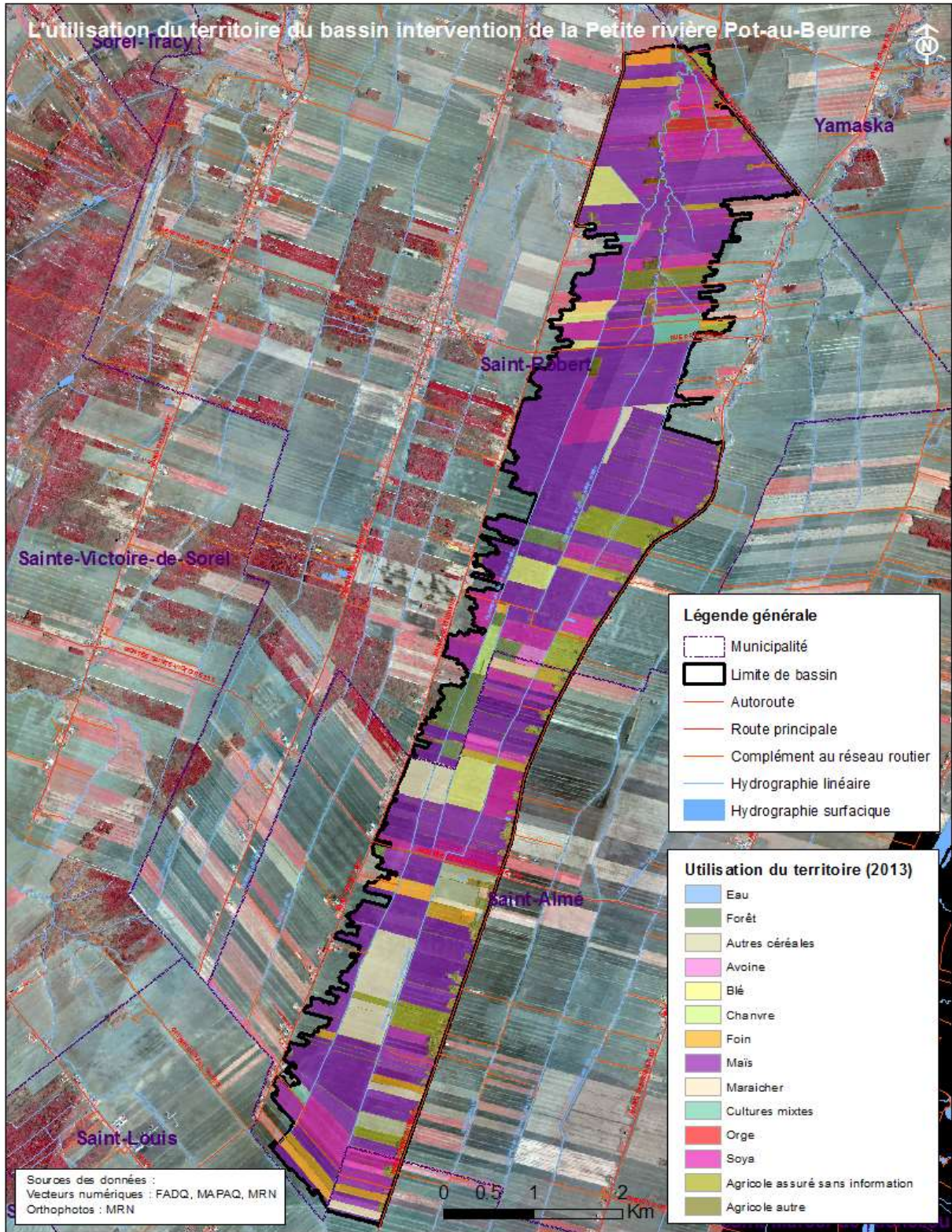


Figure 6. Utilisation du territoire du bassin de la 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre.

2.2 Dispositifs et protocoles expérimentaux

Les dispositifs et protocoles mis en place en 2009 dans le cadre du réseau de l'*Observatoire* sont spécifiquement adaptés à la détection de réponses de la qualité de l'eau dans le temps. Le dispositif repose sur un couple de micro-bassins *Témoin* et *Intervention*, de même que sur deux périodes de suivi hydrométrique, soit la période de *Référence*, précédant les interventions (2009-2011) et *Évaluation*, suivant l'introduction progressive des interventions (2013-2014). Le recours à deux périodes distinctes et à un bassin *Témoin* permet d'évaluer l'impact des actions agroenvironnementales entreprises au micro-bassin *Témoin* malgré la très grande variabilité interannuelle des conditions hydrologiques associées au climat québécois.

Les stations hydrométriques et de suivi de la qualité de l'eau sont composées de plusieurs instruments localisés aux abords et dans le cours d'eau. Les visites régulières aux sites permettent d'entretenir les équipements, de procéder aux mesures de débits, d'échantillonner les eaux des ruisseaux et de récupérer les données enregistrées par les instruments, incluant :

- les sondes barométriques (pression liée à la hauteur d'eau) et acoustique (vitesse du courant) qui enregistrent en continu la hauteur de la colonne d'eau et la vitesse moyenne du courant à travers la section d'écoulement;
- les sondes multi-paramètres, qui enregistrent en continu la turbidité, la conductivité électrique et la température de l'eau;
- les stations météorologiques, qui enregistrent en continu la température et les précipitations.

Les sondes à pression et acoustiques sont généralement installées au centre de la section d'écoulement (Figure 7), tandis que la sonde multi-paramètres, munie de dispositifs de flottaison est insérée à l'intérieur d'un tube de plastique perforé et installée près de la rive (Figure 8). Les sondes multi-paramètres sont retirées du cours d'eau avant la mise en place du couvert de glace et réinstallées à la fin de l'hiver (fin mars). Cette installation implique généralement le dégagement manuel du couvert de glace. Les jaugeages et échantillonnages ponctuels se poursuivent toutefois pendant la période hivernale. Le panneau solaire ainsi que les dispositifs électroniques d'enregistrement des mesures sont installés sur la rive (Figure 9).

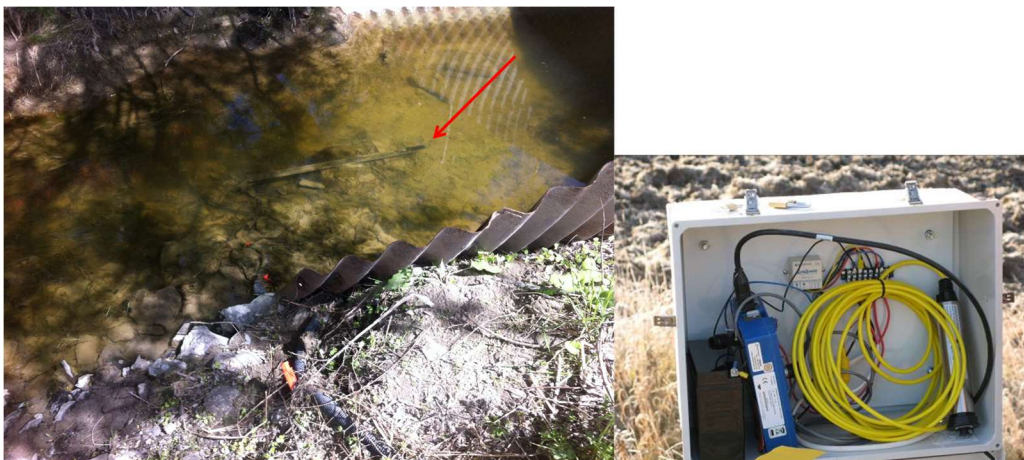


Figure 7. Le limnimètre et la sonde acoustique installés dans la 3ePRPB permettent la mesure en continu du niveau d'eau et de la vitesse du courant toute l'année.



Figure 8. La sonde multi-paramètres (vue rapprochée) installée avec un dispositif de flottaison dans le tube de plastique perforé de pvc (en noir).



Figure 9. Dispositif d'alimentation solaire et d'enregistrement électronique des mesures provenant des sondes, installé sur la rive de la 3ePRPB.

Chaque station fait l'objet d'un entretien selon un intervalle moyen de trois à quatre semaines. L'équipe terrain nettoie alors les sondes, les calibre, et en extrait les données. La section du cours d'eau est nettoyée au besoin (sédiments, végétation, glace). Un jaugeage du débit est effectué à l'aide d'un moulinet hydrométrique (Figure 10) et un échantillon d'eau est prélevé et ramené au laboratoire pour l'analyse de sa qualité. En période hivernale, l'équipe terrain brise la glace ou la perfore afin de procéder aux mesures de débit et à l'échantillonnage. L'échantillonnage de la qualité de l'eau est complété par un collaborateur local en période de crue. Le nombre d'échantillons prélevés varie en fonction de la distribution des périodes d'activité hydrologique plus intenses. Le tableau 5 présente une synthèse des visites d'entretien des stations et des mesures hydrométriques qui ont été effectuées aux stations durant la période 2013-2014. Le tableau 6 rapporte pour sa part le nombre et le type d'analyses qui ont été effectuées dans chacun des bassins au cours de la même période. Un total de 128 échantillons ont été prélevés dans le réseau de la Baie de Lavallière en 2013-2014 et dosés dans les laboratoires de l'IRDA pour l'analyse physico-chimique.



Figure 10. Mesure du débit à l'aide du moulinet hydrométrique.

Tableau 5. Synthèse des activités d'entretien et de mesures aux stations de l'*Observatoire* dans le réseau de la Baie de Lavallière pour la période d'avril 2013 à novembre 2014.

Bassin	Bassin versant	Région	Mesures et entretien des sites Avril-2013 à novembre 2014
			Hydrométrie
Petite rivière Bellevue	Baie de Lavallière	Montérégie Est	21
Petite rivière Pot-au-beurre			21

Tableau 6. Synthèse du nombre et du type d'analyses physico-chimiques et bactériologiques effectuées aux stations de l'*Observatoire* dans le réseau de la Baie de Lavallière.

Micro-bassin	Bassin versant	Région	Nombre d'échantillons Période de référence 2009-2011		Nombre d'échantillons Période d'évaluation 2013-2014	
			Physico-chimie	E. Coli	Physico-chimie	E. Coli
Petite rivière Bellevue	Baie Lavallière	Montérégie Est	98	14	63	14
Petite rivière Pot-au-beurre			97	14	65	15

Modes de traitement des données brutes et variables analysées

Les données brutes recueillies sur le terrain permettent d'établir plusieurs types de résultats utiles à l'interprétation du fonctionnement hydrologique des bassins versants, de même qu'à l'évaluation de la réponse de la qualité de l'eau aux actions concertées menées dans le bassin *Intervention*, incluant:

- l'intensité des débits et leur évolution au cours de l'année (débits instantanés et journaliers);
- la provenance de l'eau (segmentation des flux selon le parcours hydrologique de surface ou souterrain);
- les flux et charges en matières en suspension (MES) et en éléments fertilisants exportés;
- la qualité microbiologique de l'eau (coliformes);
- la détection de réponses de la qualité de l'eau aux interventions agroenvironnementales réalisées dans le bassin *Intervention*.

La figure 11 illustre les différentes étapes du traitement des données associées au suivi hydrologique des micro-bassins versants à l'étude.

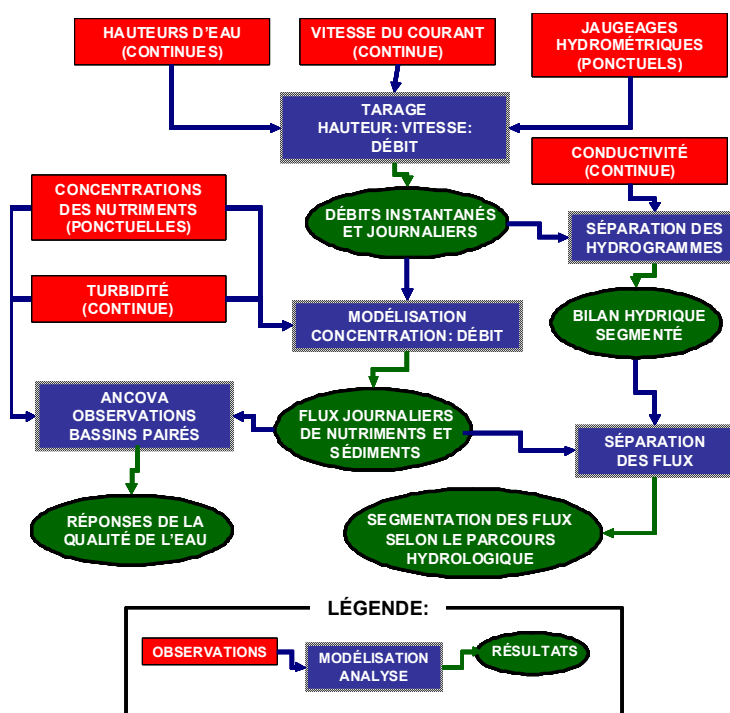


Figure 11. Schéma du traitement des données du suivi hydrologique des micro-bassins de l'Observatoire dans le réseau de la Baie de Lavallière.

Débits

Les débits instantanés (aux 15 minutes) et journaliers sont établis à partir d'un protocole de tarage hauteur-vitesse-débit¹. Les mesures de vitesse du courant permettent d'ajuster la courbe de tarage hauteur-débit en cas de refoulement du débit. La présence de couvert de glace en conditions hivernales, la végétation abondante en été et la présence de barrage de castors sont les principaux facteurs qui ont été pris en considération dans le dépouillement des données au cours de la période d'étude. Pour les besoins des comparaisons entre les bassins à l'étude, les estimations de débits sont traduites en **hauteurs spécifiques d'eau exportée** (mm) ou en **débits spécifiques** ($l\ s^{-1}\ ha^{-1}$) pour une période de temps donnée (jour, mois ou année).

Répartition de l'écoulement selon le parcours de l'eau

En s'appuyant sur les mesures de conductivité électrique et de débits des ruisseaux, les flux d'eau sont séparés selon leur cheminement de surface (ruissellement) ou souterrain (drainage artificiel et résurgence au ruisseau). Cette détermination est fondée sur le principe que l'eau qui s'est infiltrée dans le sol se charge de minéraux et présente une conductivité électrique plus élevée que l'eau qui a rejoint le ruisseau par les voies de surface.

Le dépouillement des courbes conductivité : débit permet dès lors de détecter le déclenchement du ruissellement de surface puis d'en quantifier la contribution à l'écoulement global du ruisseau au pas de temps de 15 minutes suivant une approche de calcul du bilan de masse (Michaud et al., 2009a).

Les figures 12 et 13 présentent à titre d'exemple les observations de la crue du 18 au 20 novembre 2013 au bassin 3ePRPB. La figure 12 illustre la variation du débit, de la turbidité et de la conductivité électrique de l'eau à l'exutoire du bassin *Témoin* en fonction du temps. En régime d'écoulement de base, avant la crue, le débit est à son plus bas et la conductivité à son maximum. En réponse à la crue des eaux, la conductivité diminue témoignant d'un apport croissant de ruissellement de surface au ruisseau. À l'inverse, la turbidité s'accroît, témoignant du processus d'érosion enclenché par le ruissellement de surface. En décrue, la turbidité décroît rapidement, alors que l'augmentation graduelle de la conductivité révèle l'origine, à dominance souterraine, des eaux qui atteignent maintenant l'exutoire du ruisseau.

¹ Ce protocole s'inspire de celui utilisé au Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Il permet d'établir une relation stable entre les hauteurs d'eau (mesurées toutes les 15 minutes) et les débits mesurés ponctuellement tout au long de l'année et dans des conditions contrastées.

La proportion de l'eau d'origine souterraine par rapport à l'écoulement total est exprimée sur la base des ratios observés dans les conductivités électriques de l'eau suivant l'équation suivante :

$$QB_i = \frac{Q_i (C_i - C_{\min})}{CB_i - C_{\min}}$$

où:

QB_i = Hauteur d'eau associée à un écoulement souterrain au temps « i »
(mm jour⁻¹);

Q_i = Hauteur d'eau journalière total au temps « i » (mm jour⁻¹);

C_i = Conductivité au temps « i » (μS/cm);

C_{\min} = Conductivité de référence du ruissellement de surface (μS/cm);

CB_i = Conductivité de l'écoulement de base au temps « i » (μS/cm).

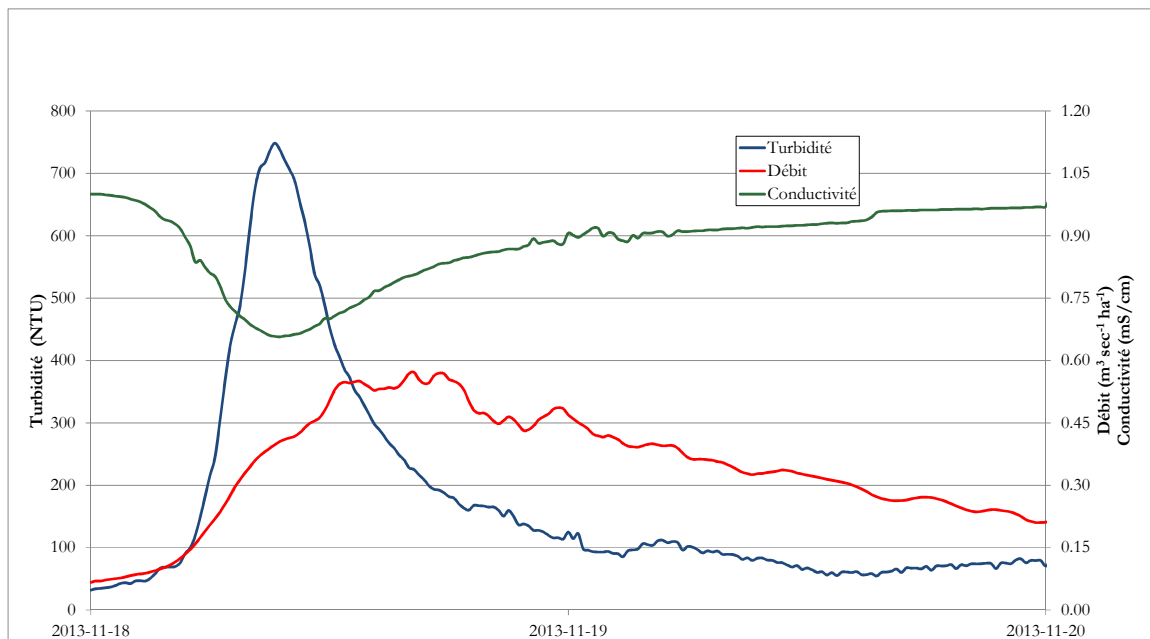


Figure 12. Exemple de variation de la turbidité et de la conductivité électrique en lien avec le débit sur 24 h. (Évènement du 18 au 20 novembre 2013, 3ePRPB).

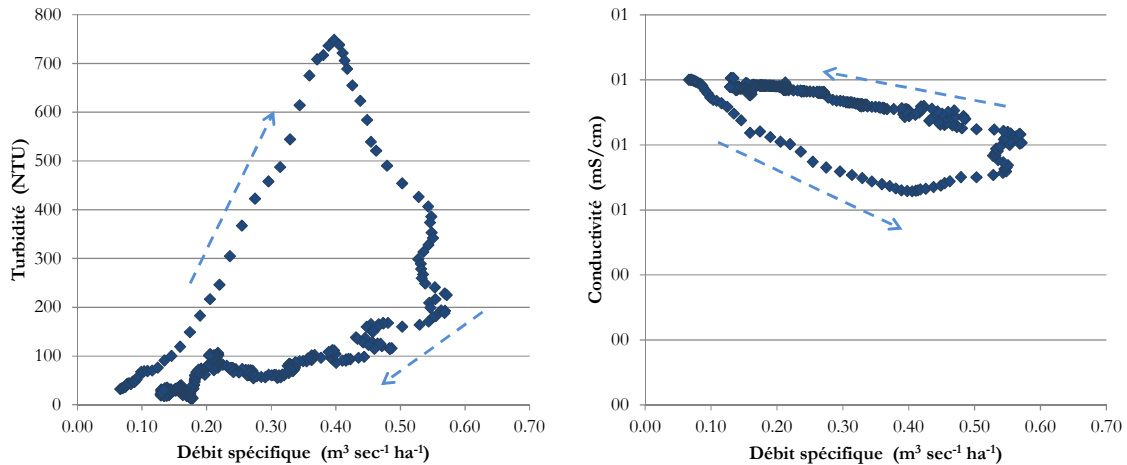


Figure 13. Fluctuation sur 24 h de la turbidité et de la conductivité électrique en fonction de la hauteur d'eau exportée (Évènement du 18 au 20 novembre 2013, 3ePRPB).

Les observations colligées témoignent de la robustesse de l'approche de séparation des hydrogrammes utilisée, dans la mesure où les différentes crues sont à l'origine de patrons similaires dans l'évolution de la conductivité en fonction du débit. La relation conductivité : débit demeure en effet relativement insensible au phénomène d'hystérésis (taux de variation semblables en montée de l'hydrogramme comme en décrue), ce qui démontre que l'approche de séparation est applicable tant en montée de l'hydrogramme qu'en récession du débit (figure 13).

La figure 13 illustre par ailleurs le phénomène d'hystérésis typiquement associé à la variation de la turbidité. Celle-ci commence par augmenter fortement dès le début de l'évènement, puis culmine généralement avec le débit de pointe. Cette progression témoigne du pouvoir érosif croissant du ruissellement de surface lors de la montée des eaux. En décrue, l'écoulement souterrain contribue à une proportion croissante du débit, avec une réduction proportionnelle de la contribution du ruissellement de surface et de son action érosive. Ainsi, la teneur en sédiments de l'eau du ruisseau est moins élevée en récession qu'en montée de l'hydrogramme, pour un débit équivalent (figure 13).

Concentrations et flux de sédiments

Les exportations de matières en suspension (MES) sont calculées à l'aide des données de turbidité des sondes multi-paramètres ainsi qu'avec les dosages en laboratoire des matières en suspension (MES) des échantillons d'eau prélevés aux exutoires des bassins versants. Une régression linéaire est établie entre les concentrations en MES des échantillons (variable expliquée) et les valeurs de turbidité de la sonde (variable explicative) lues au même moment. Les charges en MES exportées (hebdomadairement ou annuellement) sont ensuite calculées en associant la série temporelle des concentrations en MES avec celle du débit au pas de temps de 15 minutes (Michaud et al., 2009a).

Concentrations et flux de nutriments

La qualité de l'eau des échantillons ponctuels prélevés aux exutoires des micro-bassins à l'étude est évaluée suivant trois protocoles d'analyse.

- Un dosage physico-chimique est systématiquement réalisé sur l'ensemble des échantillons d'eau afin de mesurer les concentrations en azote ammoniacal (N-NH₄), nitrates (N-NO₃), phosphore total, calcium (Ca) et autres éléments majeurs et mineurs en solution (Greenberg et al., 1992a, b, c, d; Murphy et Riley, 1962; Sharpley et al., 1991).
- Pour certains échantillons, sélectionnés afin de bien représenter les différentes strates de débit, une spéciation des formes de phosphore est déterminée en laboratoire. Les concentrations en P biodisponible, P réactif soluble (principalement sous forme d'orthophosphates) et le P total dissous sont alors mesurés, en complément de la détermination de la concentration en P total. Cette spéciation des formes de phosphore permet de mettre en évidence la variabilité des formes de P et sa biodisponibilité potentielle selon le bassin versant, la saison ou la voie hydrologique empruntée (surface vs souterraine).
- Enfin, un nombre plus restreints d'échantillons sont aussi analysés afin de déterminer leurs teneurs en coliformes fécaux (*E. Coli*) et en coliformes thermotolérants. Ces échantillons sont rapidement acheminés au laboratoire et traités en moins de 48 heures après l'échantillonnage.

Les charges de nutriments sont par la suite estimées par modélisation statistique à l'aide du logiciel FLUX (Walker, 1998). L'approche de régression linéaire retenue consiste à établir la relation entre la concentration d'un paramètre de qualité de l'eau donné et le débit du cours d'eau. Des régressions linéaires distinctes sont établies pour différentes saisons (Dormance : décembre à avril; Production : mai à novembre) et/ou strates de débits (au-dessus et sous le débit limite marquant la dominance des contributions diffuses). L'ajustement des modèles d'estimation des flux est évalué par une méthode de validation croisée. Suivant le retrait de chacune des observations ponctuelles, la capacité du modèle à reproduire cette donnée avec les observations restantes est alors évaluée.

Cette approche a été utilisée depuis 10 ans dans le traitement des données de qualité de l'eau à l'IRDA et les coefficients de variation engendrés varient généralement de 5 à 15 % (Michaud et al., 2009a). Un tel niveau d'ajustement est jugé acceptable compte tenu des faibles superficies des bassins de l'*Observatoire*, qui conditionnent des réponses hydrologiques rapides. Pour les besoins de la présente étude, le seuil de CV de 20% a été retenu dans l'appréciation des modèles de flux retenus, tel que proposé par Walker (1998) pour les petits bassins versants présentant des réponses hydrologiques courtes et intenses.

Détection des changements de qualité de l'eau

En petits bassins versants agricoles, les paramètres de qualité de l'eau peuvent varier très rapidement en fonction des conditions hydrologiques. Cette réponse est aussi influencée par la saison, les propriétés du paysage et des sols, de même que par la régie des sols ou l'aménagement des terres. Ces facteurs interagissent de façon simultanée, si bien qu'il demeure difficile d'isoler leurs effets simples, comme par exemple celui associé à l'implantation concertée de nouvelles pratiques culturales ou l'aménagement hydro-agricole d'un bassin versant. L'approche biostatistique retenue pour la détection d'en effet sur la qualité de l'eau doit nécessairement tenir compte de l'ensemble des effets et de leurs interactions.

La détection d'une réponse de la qualité de l'eau suivant les actions agroenvironnementales dans le bassin *Intervention* a été supportée au moyen d'analyses de covariance (ANCOVA) appliquée aux observations de la qualité de l'eau du bassin *Intervention*, utilisant les observations du bassin *Témoin* en covariable. Cette méthode est bien adaptée à la détection des effets et des interactions des conditions hydrologiques, de la saison et de la gestion du parcellaire sur les différents paramètres de qualité de l'eau. Le recours aux observations d'un bassin Témoin permet de prendre en compte la forte variabilité des conditions hydrologiques dans la détection de gradients temporels dans la qualité de l'eau au bassin Intervention. La stratification des données selon la saison permet aussi d'évaluer un effet d'interaction de la saisonnalité avec la réponse de la qualité de l'eau. L'approche fait largement consensus dans la communauté scientifique, notamment aux États-Unis, en matière de détection d'effets d'interventions environnementales en bassins versants (Grabow et al., 1999). Plus près de nous, Michaud et al. (2009a) ont démontré l'efficacité de la méthode dans trois dispositifs de bassins versants jumeaux.

Sur le plan statistique, la méthode appliquée aux observations de la paire de bassins jumeaux consiste à comparer les droites de régression des périodes d'évaluation (2013-2014) à celles de la période de référence (2009-2011) pour les différents paramètres de qualité de l'eau. Les observations de concentration ou de flux ont été dans la plupart des cas transformées en log préalablement aux analyses ANCOVA de façon à assurer l'homogénéité de la variance de l'ensemble des observations. Les analyses ont d'abord été appliquées aux flux cumulés d'eau ou de MES générés sur une base hebdomadaire à partir des observations colligées par les sondes multi-paramètres (pas de temps de 15 minutes). La même procédure a par la suite été appliquée aux observations de concentrations instantanées de MES, phosphore, nitrates et calcium déterminées en laboratoire

À l'aide de la procédure MIXED de SAS (version 9.4), l'analyse de covariance a été appliquée aux observations de chaque bassin suivant trois étapes successives afin de déterminer si les droites sont 1) distinctes et de pentes différentes, 2) distinctes et parallèles, ou 3) confondues:

- 1) L'hypothèse d'égalité des pentes des deux droites de régression est d'abord testée. Si l'hypothèse est rejetée au seuil de signification de 0.1, un modèle aux pentes distinctes est ajusté et les estimateurs de l'ordonnée à l'origine et de la pente sont différents pour chaque période. Dans ce cas, la distance entre les droites varie en fonction de la valeur du bassin témoin. Cette interaction significative entre l'effet de la période et la concentration ou le flux de référence du bassin *Témoin* fait en sorte que des tests de comparaison doivent être effectués pour plusieurs valeurs de la variable du bassin témoin, correspondant aux centiles

10, 25, 50, 75 et 90 de la variable. L'objectif de cette démarche est d'identifier la plage de valeurs de la variable étudiée pour laquelle l'action concertée a eu un effet significatif dans le bassin *Intervention*.

2) Si l'hypothèse d'égalité des pentes ne peut être rejetée, un modèle avec pente unique est ajusté et l'hypothèse de l'égalité des ordonnées à l'origine est testée. Si cette hypothèse est rejetée au seuil de signification de 0.1, un modèle à pente unique et ordonnées à l'origine distinctes est ajusté. Comme les pentes sont parallèles, la distance entre les valeurs des deux périodes est la même quelle que soit la valeur du bassin témoin. Le test de la différence entre les deux périodes est équivalent au test d'égalité des ordonnées à l'origine. L'implication pratique de cette situation est que l'effet significatif de la période (intervention agroenvironnementale) sur le paramètre de qualité de l'eau est relativement indépendant des conditions hydrologiques.

3) Si les hypothèses d'égalité des pentes et d'égalité des ordonnées à l'origine n'ont pu être rejetées, un modèle unique est ajusté pour les données des deux périodes. Il n'y a donc pas de différence significative entre les moyennes des deux périodes pour la variable à l'étude. Conceptuellement, il n'y a donc aucune différence significative dans le paramètre de qualité de l'eau à l'étude entre la période de référence et d'évaluation, quel que soit la condition hydrologique considérée.

3 RÉSULTATS

La présente section rapporte les résultats du suivi hydrologique dans la paire de bassins versants à l'étude pour la période d'évaluation (2013-2014). Les observations de la période 2009-2011 (Michaud et al., 2012) sont également rapportées en support à l'interprétation des changements dans la qualité de l'eau entre les périodes de référence et d'évaluation. Les résultats du dépouillement des données hydrométriques sont précédés d'un portrait de la problématique agroenvironnementale du bassin *Intervention* de même que d'un bilan sommaire des activités d'accompagnement réalisées dans les bassins versants.

3.1 Problématique et action agroenvironnementale dans le bassin versant de la Baie Lavallière

La réduction des charges de sédiments vers la Baie Lavallière, reconnue à titre de Réserve mondiale de la biosphère du Lac-Saint-Pierre (UNESCO), est au cœur de préoccupations d'une coalition d'intervenants régionaux dédiée à la mise en valeur de la Baie et du bassin versant. La portion agricole de son bassin versant a fait l'objet de plusieurs projets de développements d'outils de gestion du parcellaire à référence spatiale visant à décrire et expliquer les dynamiques d'érosion au champ et en cours d'eau. Le relevé LiDAR du bassin Intervention de la 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre (3ePRPB) de la Baie de Lavallière a appuyé la réalisation d'une analyse hydrologique détaillée de la part de l'équipe de l'IRDA dans le cadre d'un projet antérieur (Belvisi et al., 2009). Le diagnostic des marques d'érosion (ravinement et affouillement de berges) a par ailleurs été mis en relation avec différents indices topographiques dérivés du LiDAR (Sunborg, 2009). Découlant d'un transfert d'expertise du MAPAQ, les clubs agroenvironnementaux La Vallière inc. et Les Patriotes offrent des services spécialisés en aménagement hydro-agricole de précision, mettant à profit les cartographies hydrologiques précises disponibles sur atlas électroniques (Belvisi et al., 2009) et en ligne (Géomont et MAPAQ, 2011).

Les résultats du suivi hydrologique de l'*Observatoire de la qualité de l'eau* en période de référence 2009-2011 (Michaud et al., 2012a) ont mis en perspective des signatures contrastées dans l'hydrologie et les flux de sédiments aux exutoires de la 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre (3ePRPB) et de la Petite Rivière Bellevue (PRB). Bien que le dispositif expérimental de l'*Observatoire* ne permette pas de documenter formellement l'origine des sédiments, plusieurs observations convergent en faveur d'une contribution importante des sédiments d'origine riveraine à la charge totale mesurée à l'exutoire de la 3ePRPB.

D'abord, le faible taux de ruissellement de surface estimé pour le bassin de la 3ePRPB en période de référence témoigne d'un pouvoir érosif modéré, soit moins de 100 mm pour une hauteur d'eau annuelle totale de 461 mm. Il s'agit en fait du plus faible taux de ruissellement de surface observé pour l'ensemble des neuf bassins de l'*Observatoire* en sol minéral. Pour la même période 2009-2011, le taux de ruissellement du bassin voisin de la Petite rivière Bellevue est nettement plus élevé, 145 mm sur une base annuelle.

Malgré une activité hydrologique de surface modérée, le taux d'exportation de sédiments de $575 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en période de référence (2009-2011) observé à l'exutoire de la 3ePRPB (Tableau 11) est 1,75 fois plus élevé qu'à la Petite Rivière Bellevue ($327 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). Une occupation du sol plus intensive dans la 3ePRPB (97% de la superficie en cultures annuelles, contre 58% dans le PRB) était identifiée comme un facteur déterminant de la vulnérabilité accrue du bassin aux processus d'érosion.

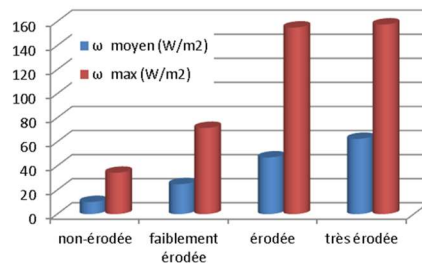
Les relevés de ravinement et de décrochement de berges dans le bassin versant de la 3ePRPB (Sunborg, 2008) indiquent par ailleurs une contribution importante de l'érosion en rive. La vulnérabilité élevée du secteur aval de la 3ePRPB est particulièrement mise en relief dans l'étude, alors que 75% des décrochements de berge de ce bassin étaient situés à une altitude de cours d'eau comprise entre 7 et 16 m, correspondant à la partie méandreuse du cours d'eau. La granulométrie fine des berges, la pente accentuée du cours d'eau et l'importance de la superficie drainée contribuaient à expliquer la vulnérabilité du secteur à l'érosion (Sunborg, 2008).

Le portrait hydrogéomorphologique du bassin versant de la Baie Lavallière réalisé par Roux (2012) dans le cadre du projet de l'*Observatoire* témoigne également de contributions d'érosion riveraine relativement plus importantes au bassin de la 3ePRPB qu'au bassin de la PRB. Fruit d'une collaboration entre l'IRDA, l'Université Concordia et Lyon 1 (France), l'étude a mis à profit les relevés hydrométriques de l'*Observatoire*, les relevés altimétriques LIDAR couvrant l'ensemble du bassin versant de la Baie Lavallière, de même qu'une série de photographies aériennes historiques de la région dans la réalisation d'un premier portrait hydrogéomorphologique du bassin versant. L'étude démontre que le bassin de la 3ePRPB se distingue à l'échelle du bassin de la Baie Lavallière par ses puissances hydrauliques élevées ($> 150 \text{ W m}^{-2}$), favorables aux processus d'érosion en berge dans son secteur aval. À l'opposé, les puissances hydrauliques estimées pour le bassin de la Petite Rivière Bellevue ne dépassent pas 35 W m^{-2} , soit le seuil au-dessus duquel la puissance de l'écoulement est suffisante pour générer de l'érosion (Figure 14). L'étude de photographies aériennes historiques indique par ailleurs que près du quart de la section méandreuse des rives de la 3ePRPB (3,600 m) présente des migrations, correspondantes à une vitesse moyenne de $0,147 \text{ m an}^{-1}$. Quant à la Petite Bellevue, seulement 2% des 18 km de rivière témoignent de migrations, pour une vitesse moyenne d'environ 0.10 m an^{-1} .

Devant le constat de l'importance des processus d'érosion riveraine dans le bassin versant, l'action concertée dans le micro-bassin Intervention de la 3ePRPB s'est centrée sur l'aménagement intégré des branches de cours d'eau, de ses rives et de ses confluences avec le réseau de drainage des terres. Les travaux d'entretien et d'aménagement prévus dans deux des trois principales branches de cours d'eau (Branche 15 et Branche 17) ont offert une opportunité privilégiée de concerter les travaux en cours d'eau coordonnés par la MRC avec des investissements dans l'aménagement des terres des 42 propriétaires riverains. Aussi, les intervenants de la MRC, du MAPAQ, de l'IRDA et des deux clubs agroenvironnementaux de la région d'étude, soit le club Lavallière et le club des Patriotes, ont épaulé un projet d'aménagement intégré des branches de cours d'eau de la 3ePRPB.

Valeurs de la puissance hydraulique spécifique pour les sites visités du bassin d'intervention de l'Observatoire (3ePRPB)

	ω_{min} ($W.m^{-2}$)	$\bar{\omega}$ ($W.m^{-2}$)	ω_{max} ($W.m^{-2}$)	État des berges
Site 1	3.57	47.11	155.03	érodées
Site 3	0.35	62.53	157.58	très érodées
Site 4a	0.06	6.89	17.21	non érodées
Site 4b	0.07	6.90	19.43	non érodées
Site 5a	0.63	16.38	34.34	non érodées
Site 5b	1.38	24.91	71.62	faiblement érodées



Site 3: très érodé

Site 1: érodé

Site 5a: non érodé

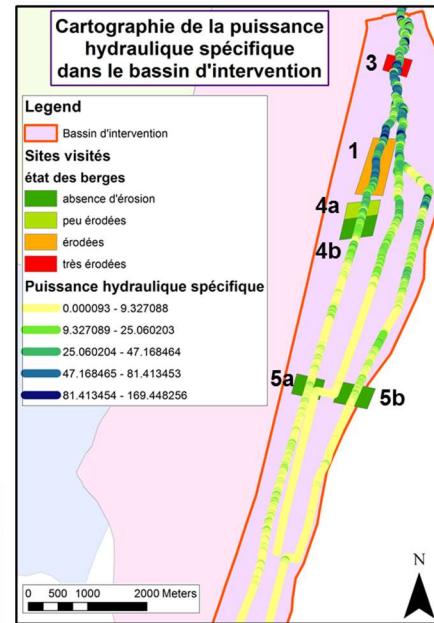


Figure 14. Valeurs de la puissance hydraulique spécifique et état des berges pour les sites visités du bassin Intervention de l'Observatoire (3ePRPB), adapté de Roux (2012).

Au plan de sa morphologie, le cours d'eau de la 3ePRPB se divise en deux parties distinctes, soit le secteur en amont du chemin principal de Saint-Robert, et la portion plus en aval. Ces deux secteurs ont respectivement été ciblés pour des travaux d'entretien (amont) et d'aménagement de cours d'eau (aval) par la MRC. La faible pente du secteur amont ne prédispose pas le ruisseau à la formation de méandres. L'accumulation de sédiments est cependant favorisée par la pente très faible du cours d'eau. La nature limoneuse des sols contribue par ailleurs à la fragilité des talus. L'accumulation de sédiments dans le lit du cours d'eau et son effet sur l'efficacité du drainage souterrain des terres a motivé les travaux d'entretien réalisés au cours de l'été 2013.

Pour le secteur aval de la 3ePRPB, le drainage des terres ne constitue pas un enjeu. La profondeur et la pente du cours d'eau permettent le drainage efficace des terres. La problématique est plutôt au niveau de l'instabilité des talus et des processus de ravinement, qui motivent des interventions plus complexes que de seuls travaux d'entretien.

Au cours de l'assemblée des intéressés du 13 mai 2013, l'ensemble des propriétaires riverains présents interpellés par les projets d'entretien et d'aménagement des cours d'eau ont été invités à participer à une action concertée de mise en valeur des ruisseaux complémentaires aux travaux coordonnés par la MRC. L'équipe du MAPAQ a présenté à cette occasion les opportunités d'accompagnement technique et financier PRIME-VERT, alors que les résultats du suivi hydrologique de l'Observatoire et leurs implications faisaient l'objet d'une présentation de l'équipe de l'IRDA.

Action concertée sur le secteur amont des branches 15 et 17

Les travaux d'entretien du secteur amont des branches 15 et 17 de la 3ePRPB ont été réalisés en cours d'été 2013 sous la coordination de la firme BMI experts-conseils Inc. Suivant le débroussaillage des rives par l'entrepreneur et précédant la réalisation des travaux mécanisés, l'équipe de l'IRDA a entrepris le diagnostic de l'état des rives, colligé sur récepteur GPS. D'un commun accord avec la MRC et BMI, des bornes ont été positionnées en haut de talus où l'aménagement de chutes enrochées (inclus au contrat d'entretien) était recommandé. L'équipe de l'IRDA a par ailleurs noté et géopositionné les marques d'érosion et les mesures complémentaires suggérées afin de prévenir le ravinement et le décrochement en rive pour l'ensemble des 44 km de rives de cours d'eau des branches 15 et 17. L'ensemble des données a été cartographié sur la base cartographique des parcours de l'eau dérivés du MNS-LIDAR réalisé antérieurement par l'IRDA dans le cadre du projet d'atlas agroenvironnemental du bassin versant de la rivière Yamaska (Belvisi et al., 2009). Les figures A1.1 à A1.6 de l'annexe 1 rapportent les observations de marques d'érosion et les opportunités d'aménagement hydro-agricoles pour le secteur amont du bassin entretenu en 2013, de même que pour le secteur aval ciblé pour des travaux d'aménagement ultérieurs.

Au printemps 2014, l'ensemble des 42 propriétaires riverains du secteur amont de la 3ePRPB ont été invités conjointement par les intervenants de la MRC, du MAPAQ, des clubs agroenvironnementaux, de l'UPA et de l'IRDA, à participer à un aménagement concerté de la bande riveraine du secteur longeant les branches fraîchement excavées no. 15 et 17. Le projet a ciblé l'aménagement d'une bande riveraine élargie d'au moins 2 m de largeur de façon à assurer la stabilité à long terme des talus. Les propriétaires ont également été informés des opportunités d'encadrement technique et financier du programme PRIME-VERT afin de compléter au besoin l'aménagement riverain par des aménagements hydro-agricoles appropriés. Les cartographies de l'égouttement de surface et des relevés de terrain colligés par l'IRDA ont été mises à la disposition des conseillers des deux clubs conseils et du MAPAQ impliqués dans la sollicitation des propriétaires. La démarche a profité d'un soutien financier dans le cadre de l'*Observatoire* de même que d'un financement du programme PRIME-VERT en soutien à la réalisation de vitrines technologiques en aménagement riverain.

Perspectives sur le secteur aval des branches 13, 15 et 17

En aval de la route principale de Saint-Robert, l'instabilité des berges a motivé la demande d'aménagement du cours d'eau. Les pentes, les puissances hydrauliques et les taux de migration de la berge élevés dans ce secteur du bassin rapportés par Roux (2012) expliquent les sites actifs d'érosion observés en talus. La proximité des travaux aratoires aux talus, voire l'absence de bande riveraine, y accentue par endroits la problématique d'érosion. Suivant un appel de projets de la MRC, le contrat de conception des travaux d'aménagement a été confié à la firme Florian Bernard, mais les travaux n'ont pas été réalisés à ce jour, notamment en raison des coûts importants impliqués.

Le portrait hydrogéomorphologique de cette section de cours d'eau (Roux, 2012) indique que des travaux hydro-agricoles « classiques » de stabilisation, incluant la protection en pied de berge ou le reprofilage des talus en proie à l'érosion, ne permettrait pas de contrer à long terme le processus naturel de formation de méandres. La conservation d'un corridor riverain respectant l'espace de liberté naturel du cours d'eau se présente ainsi comme une solution à long terme à l'instabilité des rives du secteur. Le principe de laisser le cours d'eau développer

son parcours sinueux permet de ralentir son écoulement et de stocker temporairement une partie des sédiments, tout en protégeant mieux les berges si l'on permet à une végétation arbustive de s'établir dans la bande riveraine.

Sur la base d'une évaluation préliminaire à partir des données colligées dans le cadre de l'étude de Roux (2012), une largeur moyenne de bande riveraine de l'ordre 17 m serait à envisager (Biron, 2013) sur près de 7 km de rivière. Toutefois, cette largeur recommandable serait appelée à varier, notamment à la baisse dans le secteur plus en amont de la rivière. Dans certains cas, les zones potentielles d'espace de liberté possèdent déjà une bande riveraine très large avec végétation. La superficie de zones végétalisées à l'intérieur de l'espace théorique de liberté est actuellement d'environ 11,7 hectares, soit près de la moitié de l'espace potentiellement requis. Il ne manquerait donc qu'environ 12 hectares de terres cultivées pour atteindre la superficie d'espace de liberté. Bien que la valeur des terres soit particulièrement élevée dans le secteur d'étude, il n'est pas exclu que le montant de compensations soient compétitif par rapport aux coûts élevés et récurrents des travaux hydro-agricoles visant à stabiliser les zones en proie à l'érosion.

S'il y a vraisemblablement un intérêt économique et environnemental à respecter le principe d'espace de liberté du cours d'eau, certains secteurs riverains requièrent toutefois des travaux de stabilisation et de protection anti-érosive, notamment à proximité des ponceaux. En complémentarité de l'établissement d'un corridor de liberté du cours d'eau, ces secteurs offrent l'opportunité de conjuguer plusieurs pratiques alternatives en aménagement de cours d'eau, telles que la mise en place de seuils dissipateurs d'énergie, l'aménagement de sections à deux chenaux, ou l'application des principes du génie végétal.

3.2 Suivi hydrologique 2013-2014

Cette section présente les résultats du suivi hydrologique des bassins Petite-Rivière-Bellevue (PRB) et de la 3^e Petite Rivière-Pot-au-Beurre (3ePRPB) pour la période de référence 2009-2011 et d'évaluation 2013-2014. Les débits stratifiés des ruisseaux et leurs flux respectifs de sédiments sont d'abord présentés, suivis des flux de phosphore, de nitrates et de calcium. Enfin, l'analyse en covariance de l'ensemble ces paramètres de qualité de l'eau est mise à profit dans la détection d'une évolution significative au ruisseau 3ePRPB (bassin Intervention) entre les deux périodes d'étude, en utilisant les observations du ruisseau PRB (bassin Témoin) en covariable.

Dans le cadre d'un autre projet ciblé sur les critères hydrologiques de conception des ouvrages hydro-agricoles (Michaud et al., 2014), les deux bassins ont également profité d'une analyse hydrologique systématique de leurs crues. Pour en savoir plus, le lecteur est invité à télécharger le rapport de recherche de ce projet sur le site WEB de l'IRDA.

Hauteurs d'eau et débits.

La figure 15 illustre les précipitations, les débits journaliers et l'écoulement souterrain observés aux stations de la petite Rivière-Bellevue (PRB) et de la 3^e petite Rivière-Pot-au-Beurre (3ePRPB) pour la période d'évaluation depuis avril 2013 à octobre 2014. Le tableau 7 présente la somme des hauteurs d'eau exportées pour la même période, suivant la stratification des écoulements en débit spécifique de base ($< 0,127 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) et débit de crue ($> 0,127 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$). Dans l'ensemble, la hauteur d'eau exportée à l'exutoire du bassin de la 3ePRPB (664 mm) est inférieure à celle du bassin de la PRB (809 mm). Ce gradient se démarque des hauteurs d'eau exportées en période de référence, alors que les deux bassins affichaient des bilans pratiquement équivalents, à 1193 et 1114 mm respectivement pour les bassins PRB et 3ePRPB (Tableau 8). L'analyse de covariance (ANCOVA) des débits hebdomadaires illustrée en figure 18 indique que ce gradient à la baisse dans les hauteurs d'eau relatives de la 3ePRPB est attribuable à une réduction significative des débits de crue. Au percentile de 90% de la distribution des débits hebdomadaires ($26 \text{ mm semaine}^{-1}$), cette réduction significative au bassin de la 3ePRPB est de l'ordre de 23%. À l'inverse, l'ANCOVA révèle une augmentation des débits dans la strate d'écoulement de base en période d'évaluation au bassin de la 3ePRPB. En étiage, au percentile de 10% ($0,6 \text{ mm semaine}^{-1}$), l'augmentation relative des débits hebdomadaires au bassin de la 3ePRPB est de l'ordre de 71% ($p < 0,0001$) par rapport à la période de référence. Pour le 25^e percentile du débit de référence (D25), à $1,3 \text{ mm semaine}^{-1}$, l'augmentation du débit hebdomadaire en période de référence est de l'ordre de 44% ($p < 0,01$).

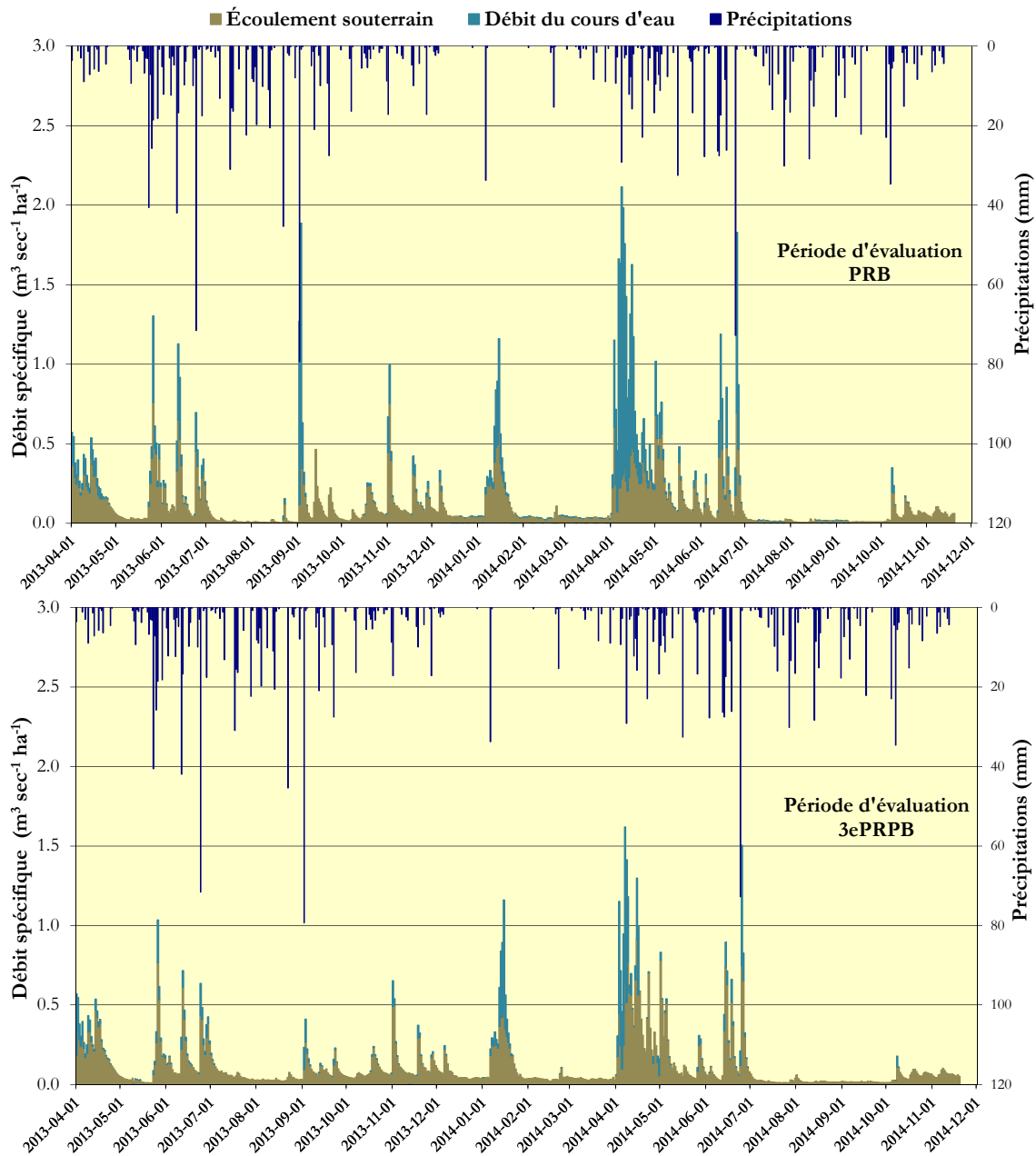


Figure 15. Séries chronologiques des débits spécifiques (ruissellement et écoulement souterrain) et des précipitations journalières observées aux stations de la PRB et de la 3ePRPB.

Tableau 7. Stratification des écoulements de base et de crue pour la période d'évaluation du 1^{er} avril 2013 au 2 octobre 2014 de la PRB et de la 3ePRPB.

Strate No.	Débit spécifique (l s ⁻¹ ha ⁻¹)	Période (mois/jour)	Bassin Bellevue			Bassin Pot-au-Beurre		
			Jours	Lame d'eau exportée		Jours	Lame d'eau exportée	
1	< 0,127		385	127 mm	0,33 mm jr ⁻¹	400	158 mm	0,40 mm jr ⁻¹
2	> 0,127	05/01-12/01	92	330 mm	3,59 mm jr ⁻¹	77	221 mm	2,87 mm jr ⁻¹
3	> 0,127	12/01-05/12	73	352 mm	4,82 mm jr ⁻¹	73	285 mm	3,90 mm jr ⁻¹
Global			550	809 mm		550	664 mm	
Précipitations: 1 715 mm								

Au final, la proportion relative de la hauteur d'eau totale exportée dans la strate de débit de base augmente de 18 à 24% au bassin de la 3ePRPB, entre la période de référence à la période d'évaluation, alors qu'elle diminue, de 19 à 16%, à la PRB au cours des mêmes périodes. À l'inverse, la proportion de l'eau évacuée en période de crue pour la saison de production (mai à novembre) s'accroît de 33 à 41% à la PRB, entre les périodes de référence et d'évaluation, alors que cette proportion diminue de 38 à 33% à la 3ePRPB.

Il est estimé que cette différence marquée dans les bilans hydrologiques des deux bassins à l'étude entre les périodes de référence et d'évaluation témoigne de l'effet des travaux d'entretien de la 3ePRPB sur le drainage des terres de tout le secteur amont du bassin versant (amont du chemin Robert). L'augmentation des débits de base de la 3ePRPB, particulièrement en saison de production (mai-novembre) traduit une efficacité accrue du drainage souterrain en période d'évaluation, suivant l'enlèvement des sédiments accumulés dans le cours d'eau. Réciproquement, cette efficacité accrue du drainage souterrain expliquerait aussi la baisse significative des hauteurs d'eau exportées dans la strate de crue (D90), au cours de la saison de production. Une évacuation souterraine plus efficace des eaux excédentaires suivant l'entretien de la section amont du bassin aurait ainsi favorisé le laminage des crues à l'exutoire du bassin de la 3ePRPB.

L'efficacité accrue des systèmes de drainage souterrain suivant l'entretien du cours d'eau se reflète également dans les séparations des hydrogrammes respectifs des deux bassins. Les variations des signaux de conductivité électrique témoignent en effet d'une réduction de la hauteur d'eau drainée en période d'évaluation au bassin versant Témoin (PRB), passant de 71% à 66% de la hauteur d'eau totale, de la période de référence à la période d'évaluation (Tableau 8). Ce gradient inter-périodes au bassin Témoin témoigne de conditions agroclimatiques favorisant l'émission d'un ruissellement de surface plus abondant en période de référence, qu'en période d'évaluation. Malgré ce gradient, une augmentation de l'écoulement souterrain est plutôt observée au bassin 3ePRPB (de 79% à 82%).

En somme, l'analyse ANCOVA des débits du bassin 3ePRPB, utilisant les débits du bassin PRB en covariable, la stratification des débits avant et après intervention, de même que l'évolution des signaux de conductivité électrique des cours d'eau s'accordent tous dans la détection d'un changement significatif dans le régime hydrique de la 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre suivant l'aménagement du secteur amont du ruisseau. Les gradients témoignent d'une augmentation du débit de base et de la proportion de la hauteur d'eau totale évacuée par les systèmes de drainage. En contre-partie, les débits de crue sont atténués.

Tableau 8. Précipitations et écoulement souterrain en période de référence et en période d'évaluation dans le bassin de la PRB et de la 3ePRPB.

	Période de référence, juin 2009 à octobre 2011		Période d'évaluation, avril 2013 à octobre 2014	
	PRB	3ePRPB	PRB	3ePRPB
Précipitations (mm)	1193	1114	809	664
Eau souterraine (mm)	843	877	530	544
% souterrain	71%	79%	66%	82%

Un changement marqué dans les pratiques culturales dans le bassin versant de la 3ePRPB entre les deux périodes d'étude (Laferrière, 2014) aurait aussi possiblement contribué à une diminution de l'intensité des crues. Il est en effet postulé que la transition de superficies en semis direct vers le travail réduit aurait contribué à l'augmentation de la rugosité de surface dans ces champs, favorisant du coup la détention et l'infiltration du ruissellement de surface au sortir de l'hiver, alors que se concentre la majeure partie des eaux ruisselées annuellement.

Concentrations et charges sédimentaires.

La figure 16 présente les séries chronologiques de débits et de concentrations en matières en suspension (MES) dérivées des signaux de turbidité au pas de temps de 15 minutes pour les bassins de la PRB et la 3ePRPB en période d'évaluation 2013-2014. Dans l'ensemble, les observations de turbidité colligées en continu par les sondes aux exutoires des deux bassins témoignent de concentrations et de flux de sédiments plus élevées à la station de la 3ePRPB qu'à celle de la PRB. Pour la période d'évaluation d'avril 2013 à octobre 2014 (550 jours de suivi avec sondes en place), la charge de matières en suspension (MES) à la station de la 3ePRPB (1258 Mg) est le double de celle observée à la station de la PRB (584 Mg). Tel que rapporté au tableau 9, ces différences dans les bilans sédimentaires globaux des deux bassins en période d'évaluation sont semblables aux gradients observés en période de référence. La distribution saisonnière des bilans hebdomadaires sédimentaires des deux ruisseaux, tel qu'illustré en figure 17 n'indique par ailleurs aucune tendance.

Tableau 9. Charges et concentrations moyennes pondérées pour le débit de matières en suspension observées aux exutoires des bassins 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre et Petite rivière Bellevue au moyen des sondes multi-paramètres pour la période de référence 2009-2011 et la période d'évaluation 2013-2014.

	Période de référence (883 jours, juin 2009 à octobre 2011)		Période d'évaluation (550 jours, avril 2013 à octobre 2014)	
	Bassin Bellevue	Bassin Pot-au-Beurre	Bassin Bellevue	Bassin Pot-au-Beurre
Charge (Mg)	1 273	2 708	584	1 258
Concentration (mg l ⁻¹)	66	125	45	97
Hauteur d'eau exportée (mm)	1193	1114	809	664

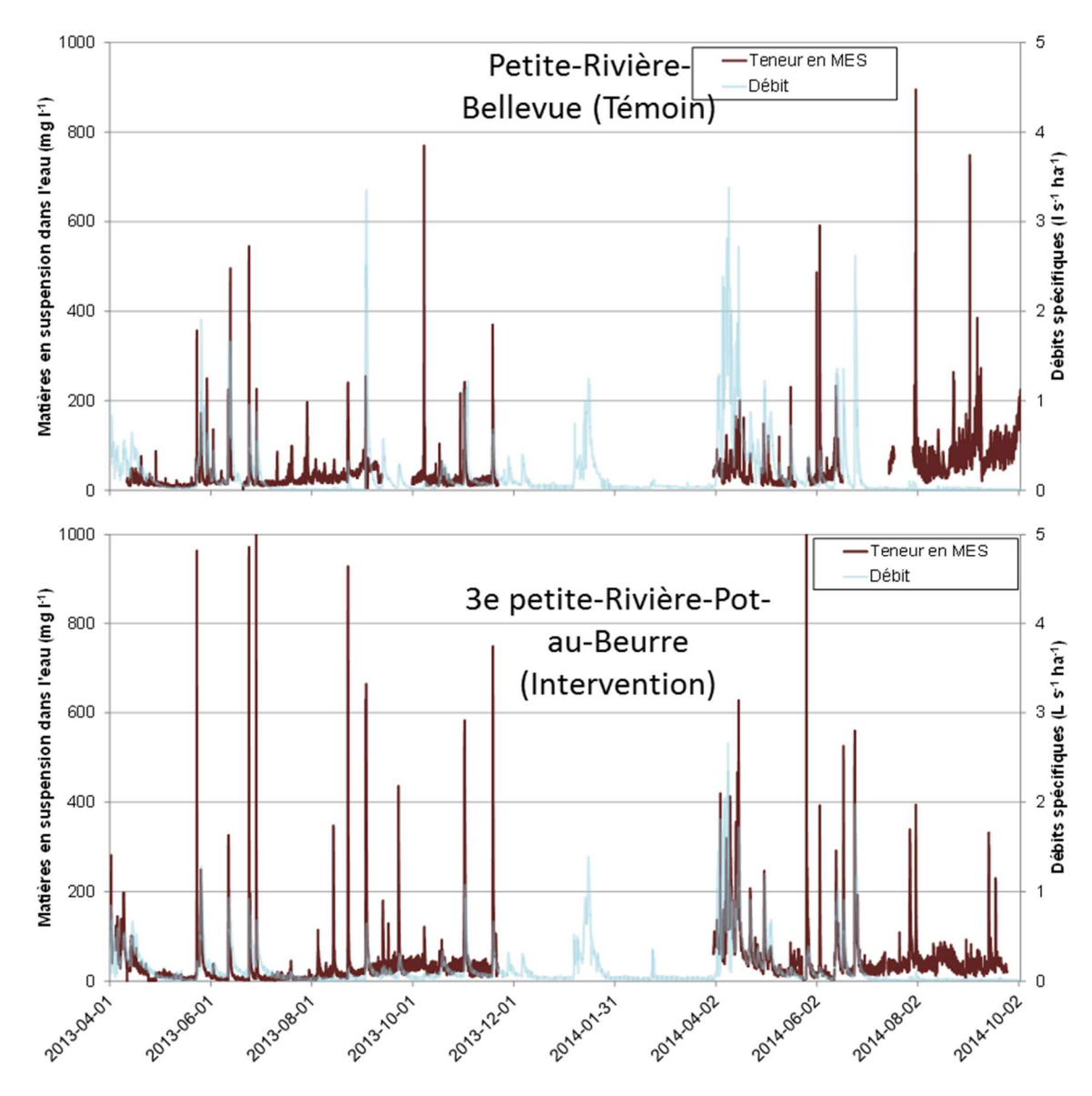


Figure 16. Séries chronologiques des concentrations instantanées (15 minutes) en matières en suspension (MES) et des débits spécifiques observés aux stations de la 3ePRPB et PRB du réseau Lavallière pour la période d'évaluation 2013-2014.

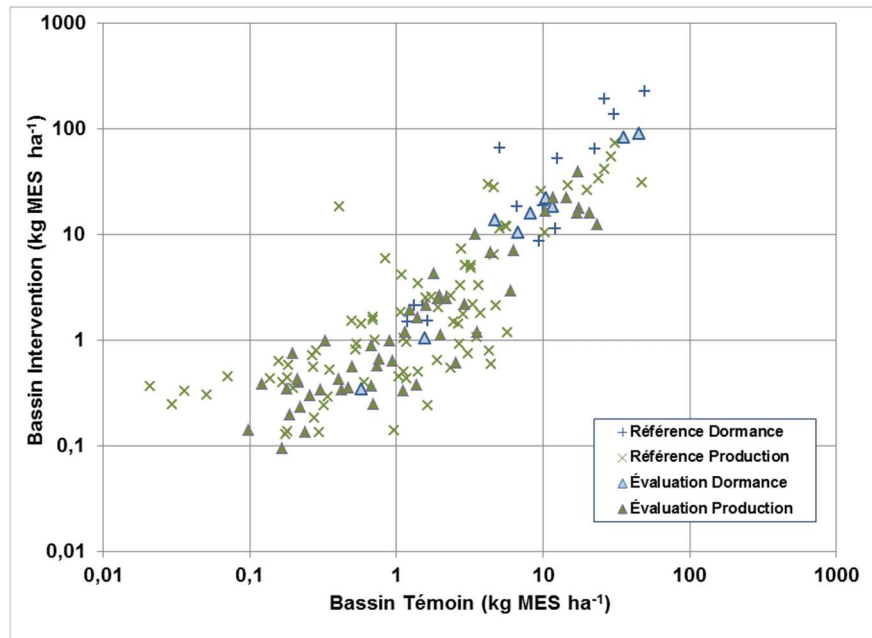


Figure 17. Comparaison des flux hebdomadaires de matières en suspension entre le bassin témoin (petite rivière Bellevue) et le bassin intervention (3^e Petite rivière Pot-au-Beurre) de la Baie de Lavallière dérivés des sondages en continu de la turbidité.

L'analyse statistique (ANCOVA) des flux hebdomadaires de sédiments présentée au tableau 10 et illustrée en figure 18 confirme qu'aucune différence n'est détectée au bassin de la 3ePRPB en période d'évaluation. Le même constat découle de l'étude des gradients de flux instantanés de matières en suspension (MES dosés en laboratoire) entre les périodes de référence et d'évaluation, tel que rapporté au tableau 11 et figure 16. Rappelons que le suivi des concentrations de MES mesurées en laboratoire découlent des campagnes d'échantillonnages simultanées des ruisseaux et permet ainsi une évaluation indépendante des flux de sédiments hebdomadaires révélés par le monitoring en continu de la turbidité par les sondes. La cohérence entre les variabilités des observations en continu de la turbidité et les déterminations analytiques instantanées de MES renforce le constat que les travaux d'entretien des cours d'eau et d'aménagement riverain dans le secteur amont du bassin de la 3ePRPB n'ont pas affecté de façon significative le bilan sédimentaire du bassin versant.

Tableau 10. Résultats de l'analyse de covariance de l'effet de la période (Référence 2009-2011 vs évaluation 2013-2014) sur le débit et le flux hebdomadaire de la matière en suspension (sonde de turbidité) du ruisseau Intervention (3e Petite Rivière Pot-au-Beurre), utilisant les observations appariées du bassin témoin (Petite Rivière Bellevue) en covariable.

Paramètre	Type de modèle final ¹	Degré de liberté (den)	Valeur F des effets fixes			Moyenne des moindres carrés ²		Différence	
			Période	Covariable	Covariable X Période	Période de référence	Période d'évaluation	(%)	P>t
Débit (mm sem ⁻¹)	PD	199	22,44	-	909,64	4,51	4,95	Nulle	NS
Flux MES (kg ha ⁻¹ sem ⁻¹)	MU	152	-	416,47	-	2,1	2,1	Nulle	NS

¹ PD: Pentas de régression distinctes pour les deux périodes; MU: Modèle unique pour les deux périodes.

² Valeurs anti-log des moyennes pour la valeur médiane (D50) de la covariable (valeur du bassin témoin).

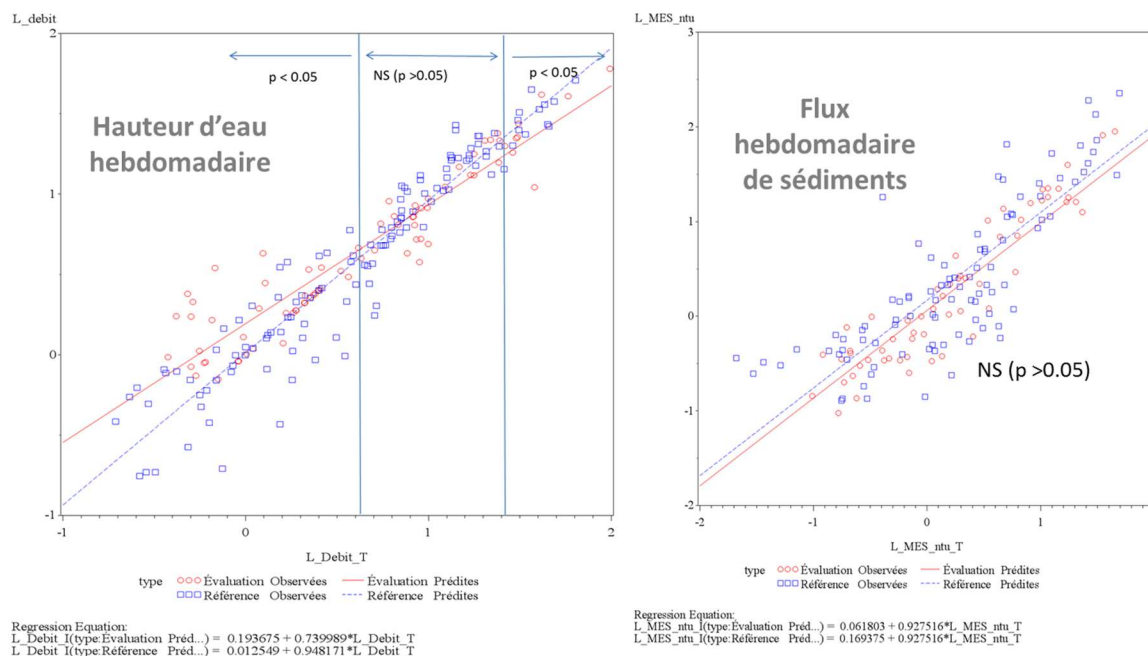


Figure 18. Analyse de covariance de l'effet de la période (référence 2009-2011 vs Évaluation 2013-2014) sur la hauteur d'eau et le flux de sédiments hebdomadaires du ruisseau de la 3e Petite Rivière Pot-au-Beurre (bassin Intervention), utilisant les observations de la Petite Rivière Bellevue en covariable.

L'absence d'effet significatif sur l'exportation de sédiments en période d'évaluation au bassin de la 3ePRPB, malgré l'ampleur des travaux réalisés, est cohérente avec les diagnostics d'érosion et le portrait hydrogéomorphologique mentionnés précédemment. Rappelons que le secteur aval du bassin n'a pas profité de mesures d'aménagement hydro-agricole. Les travaux d'aménagements en secteur amont n'auraient eu ainsi qu'un effet marginal sur le flux total de sédiments à l'exutoire du bassin, dont les sources principales se situent plutôt en secteur aval. L'absence d'effet de l'aménagement hydro-agricole valide en quelle sorte le constat de la vulnérabilité plus élevée du secteur aval du bassin versant au processus érosif.

Si l'aménagement du secteur amont du bassin n'a pas réduit l'exportation de sédiments, il est heureux de constater qu'il n'a pas contribué à l'augmenter non plus. Ce constat témoigne de bonnes conditions dans la réalisation des travaux d'entretien. L'exposition du fond des branches de cours d'eau n'a pas contribué à augmenter de façon significative les flux de sédiments. La réduction des débits de la 3ePRPB dans la strate de crue suivant les travaux hydro-agricoles est aussi une bonne nouvelle, dans la mesure où une augmentation des débits dans le secteur amont du ruisseau aurait pu contribuer à exacerber les processus d'érosion en section aval, particulièrement vulnérable.

Tableau 11. Concentrations moyennes pondérées pour le débit et charges spécifiques de phosphore, d'azote et de calcium estimées aux exutoires des bassins de la Petite rivière Bellevue et de la 3e Petite rivière Pot-au-Beurre en période de référence (2009-2011), et d'évaluation (2013-2014).

Paramètre de qualité de l'eau	Période de référence, septembre 2009 à octobre 2011						Période d'évaluation, avril 2013 à octobre 2014					
	Bassin Bellevue			Bassin Pot-au-Beurre			Bassin Bellevue			Bassin Pot-au-Beurre		
	Charge (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)	Conc. (µg l ⁻¹)	CV ¹	Charge (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)	Conc. (µg l ⁻¹)	CV ¹	Charge (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)	Conc. (µg l ⁻¹)	CV ¹	Charge (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)	Conc. (µg l ⁻¹)	CV ¹
Matières en suspension ²	327	66 174		575	124 672		241	44 786		429	97 230	
Phosphore total	0,85	172	0,186	0,93	203	0,114	0,62	116	0,089	0,89	202	0,097
Phosphore total dissous	0,12	25	0,112	0,14	30	0,075	0,25	46	0,149	0,28	64	0,094
Nitrates	14	2 802	0,069	28	5 973	0,106	14	2 636	0,152	22	5 031	0,106
Calcium	161	32 703	0,029	337	73 242	0,029	168	31 340	0,076	333	75 554	0,061
Hauteur d'eau exportée	1 193 mm			1114 mm			809 mm			664 mm		
Durée du monitoring	883 jours			883 jours			550 jours			550 jours		

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

(2) Estimation dérivée des observations de turbidité (sondes multi-paramètres).

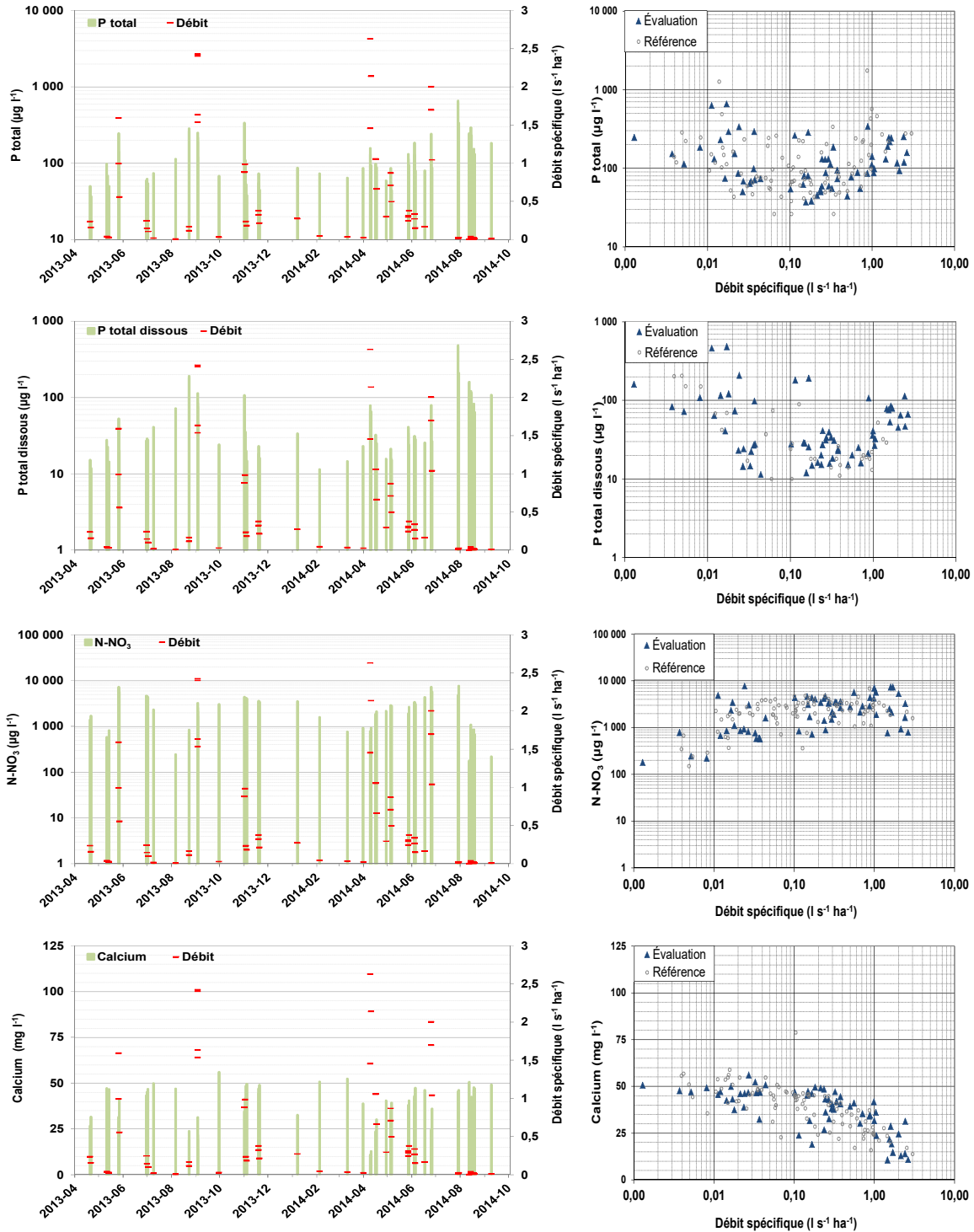


Figure 19. Concentrations instantanées observées en P total, P total dissous, nitrates et calcium en fonction de la date d'échantillonnage et du débit spécifique à la station de la Petite-Rivière-Bellevue pour la période d'évaluation 2013-2014 et la période de référence 2009-2011.

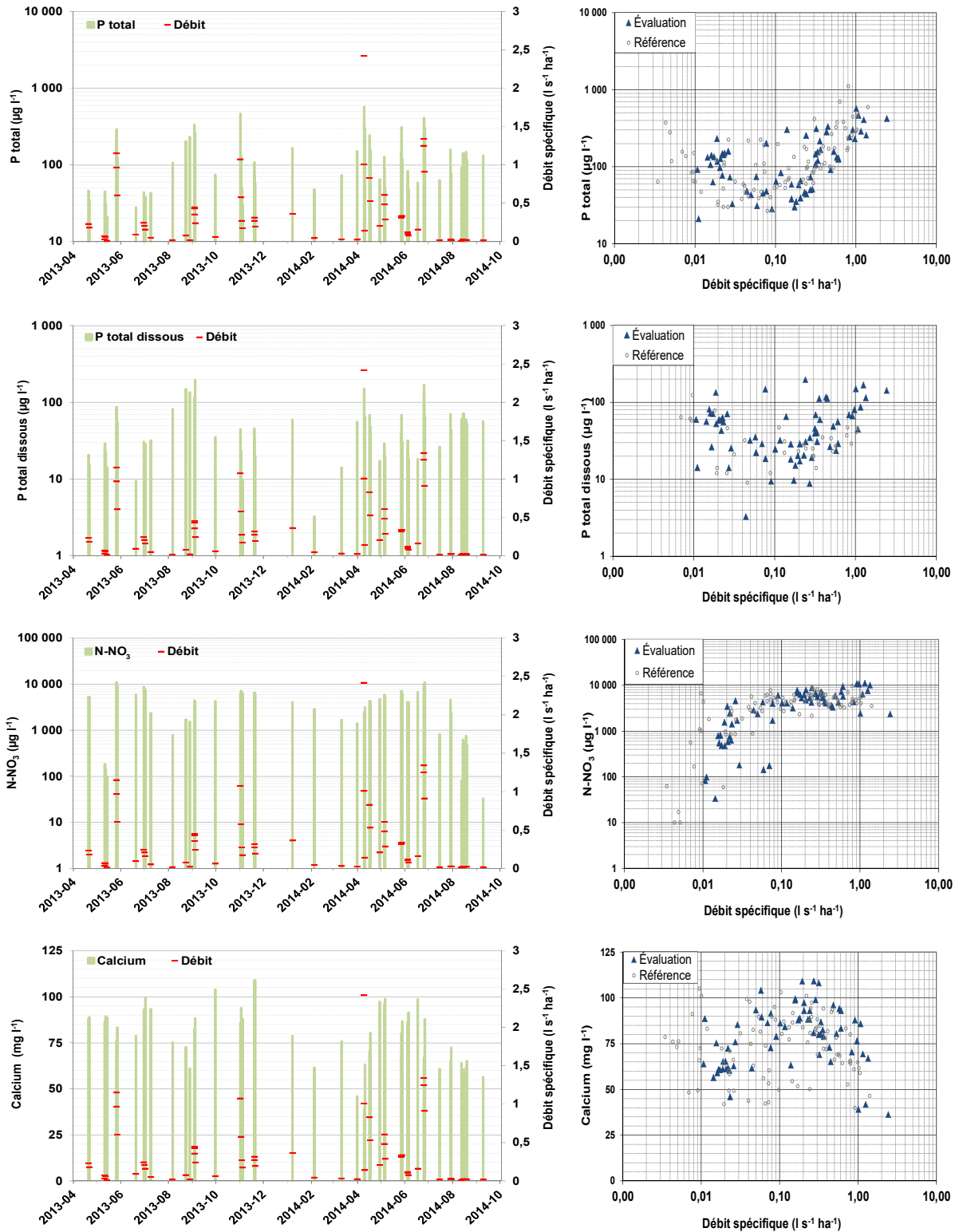


Figure 20. Concentrations instantanées observées en P total, P total dissous, nitrates et calcium en fonction de la date d'échantillonnage et du débit spécifique à la station de la 3e Petite Rivière-Pot-au-Beurre pour la période d'évaluation 2013-2014 et la période de référence 2009-2011.

Concentrations et flux de nutriments.

Les figures 19 et 20 présentent les concentrations observées en P total, en P soluble, en nitrates et en calcium en fonction des débits spécifiques et de la date d'échantillonnage aux stations hydrométriques de la PRB et de la 3ePRPB, respectivement, pour la période d'évaluation 2013-2014. Les distributions des observations de concentrations en fonction des débits instantanés au moment des échantillonnages sont également illustrées pour les périodes de référence 2009-2011 et d'évaluation 2013-2014 à titre de comparaison. Le tableau 11 rapporte pour sa part les estimations de charges et les concentrations moyennes pondérées pour le débit des différents paramètres de qualité de l'eau pour les deux bassins et les deux périodes. Les résultats sont alors rapportés en charges spécifiques (kg ha^{-1}) pour les fins de la comparaison des exportations entre les bassins. Enfin, les résultats de la détection de différences significatives entre les flux et les concentrations instantanées observées entre la période de référence et la période d'évaluation sont rapportés au Tableau 12 et illustrés en figure 21.

Tableau 12. Résultats de l'analyse de covariance de l'effet de la période (Référence 2009-2011 vs évaluation 2013-2014) sur le débit de même que les concentrations et les flux instantanés de MES, phosphore, nitrates et calcium observés au bassin Intervention (3^e Petite Rivière Pot-au-Beurre) utilisant les observations appariées du bassin témoin (Petite Rivière Bellevue) en covariable.

Paramètre	Type de modèle final ¹	Degré de liberté (den)	Valeur F des effets fixes			Moyenne des moindres carrés ²		Différence	
			Période	Covariable	Covariable X Période	Période de référence	Période d'évaluation	(%)	P>t
Débit (mm jr^{-1})	PD	145	2,95	-	272,31	1,03	1,08	Nulle	NS
Conc. MES (mg l^{-1})	PD	182	5,09	-	66,16	37,5	40,2	Nulle	NS
Flux MES ($\text{g ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$)	MU	147	-	347,47	-	301	301	Nulle	NS
Conc. Ptotal (ug l^{-1})	MU	147	-	97,15	-	97,2	97,2	Nulle	NS
Flux Ptotal ($\text{g ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$)	MU	145	-	442,22	-	0,87	0,87	Nulle	NS
Conc. Pdissous (ug l^{-1})	MU	88	-	73,97	-	30,8	30,8	Nulle	NS
Flux Pdissous ($\text{g ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$)	MU	88	-	213,18	-	0,34	0,34	Nulle	NS
Conc. NO3 (mg l^{-1})	MU	145	-	152,2	-	3,16	3,16	Nulle	NS
Flux NO3 ($\text{g ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$)	MU	147	-	452,42	-	42,7	42,7	Nulle	NS
Conc. Ca (mg l^{-1})	MU	146	-	33,76	-	73,8	78,5	Nulle	NS
Flux Ca ($\text{g ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$)	PD	145	13,05	-	260,64	938,6	919,2	Nulle	NS

¹ PD: Pentas de régression distinctes pour les deux périodes; MU: Modèle unique pour les deux périodes.

² Valeurs anti-log des moyennes pour la valeur médiane (D50) de la covariable (valeur du bassin témoin).

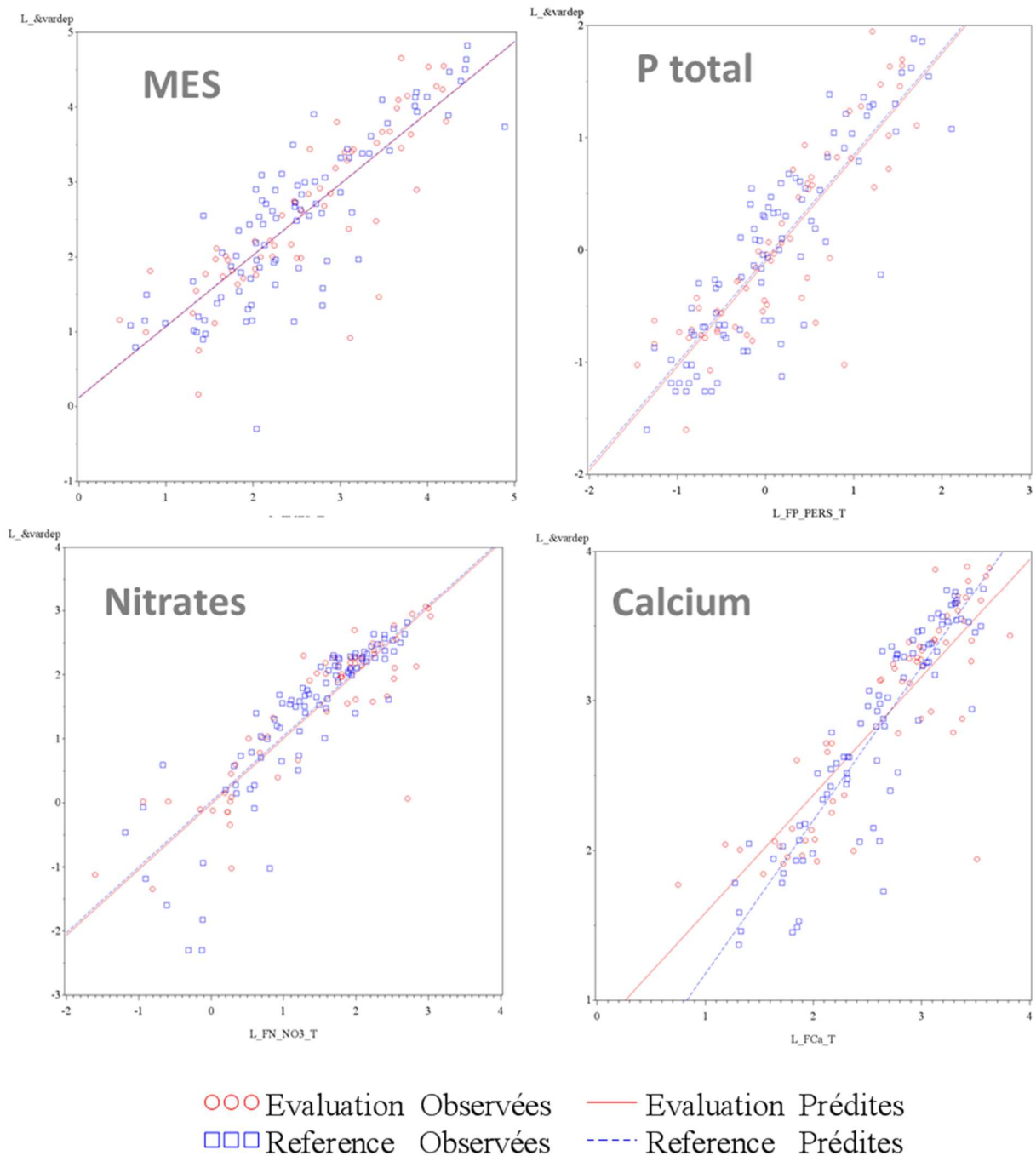


Figure 21. Analyse de covariance de l'effet de la période (référence 2009-2011 vs Évaluation 2013-2014) sur les flux instantanés de MES, P total, nitrates et calcium du bassin de la 3e Petite-Rivière-Pot-au-Beurre (bassin Intervention), utilisant les observations du bassin de la Petite-Rivière-Bellevue en covariable.

Phosphore.

Dans l'ensemble, les concentrations en P total (phosphore total) témoignent d'une étroite corrélation avec les concentrations de MES, qui s'explique par la dominance de la fraction particulaire du phosphore exporté aux exutoires des deux bassins versants. Aussi, les flux et les estimations de concentrations moyennes pondérées en P total (Tableau 11) demeurent environ deux fois plus élevés au bassin de la 3ePRPB qu'au bassin de la PRB en période d'évaluation, reflétant le ratio des apports sédimentaires. La concentration moyenne pondérée en P total estimée au bassin de la 3ePRPB se situe à $202 \mu\text{g l}^{-1}$, soit à toute fin pratique identique à celle qui prévalait en période de référence 2009-2011, avant les travaux d'entretien du cours d'eau. Au bassin de la PRB, la concentration estimée diminue sensiblement de la période de référence ($172 \mu\text{g l}^{-1}$) à la période d'évaluation ($116 \mu\text{g l}^{-1}$). Ces gradients doivent cependant être interprétés avec réserve en raison de l'incertitude de leurs estimations. En effet, malgré un nombre élevé d'échantillons prélevés et analysés en période de référence 2009-2011 dans les bassins de la 3ePRPB (98) et PRB (97), l'ajustement du modèle concentration-débit pour le phosphore au bassin de la PRB ($CV=0,19$) rencontre à peine le critère de qualité établi (0,20). Il est estimé que cette performance mitigée dans l'évaluation des flux de P total est liée en large partie à la nature particulaire dominante du P exporté, qui favorise les phénomènes d'hystérésis (concentration influencée par le cycle de crue/décru). Ce phénomène n'est pas pris en compte dans la méthode courante de modélisation concentration : débit.

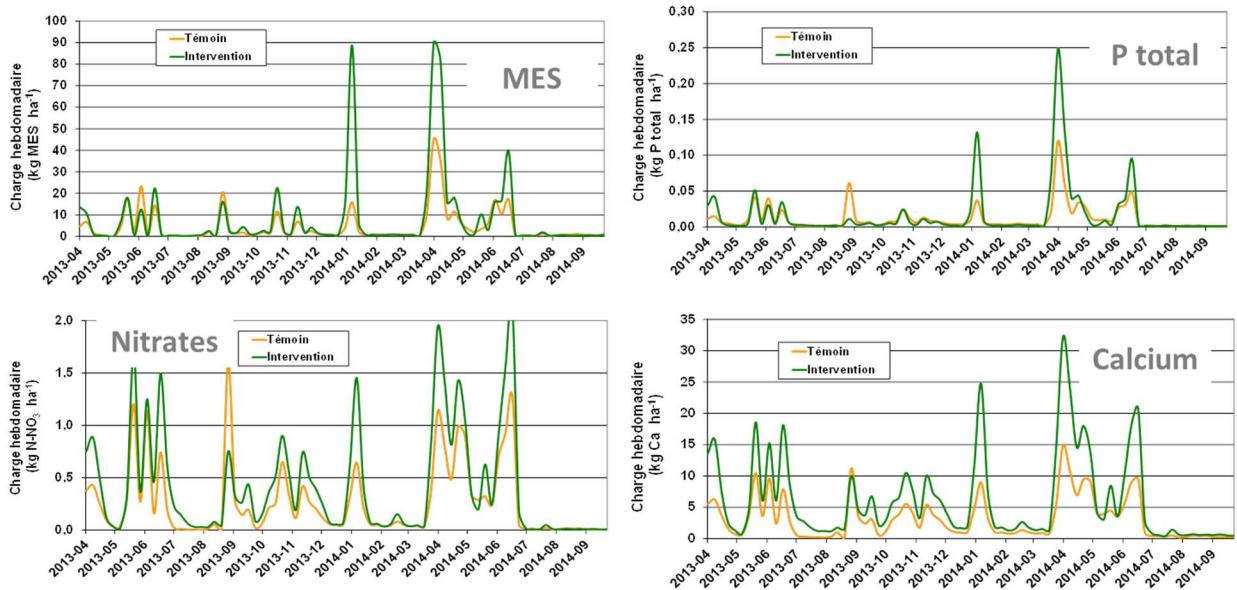


Figure 22. Séries chronologiques des flux hebdomadaires de MES, phosphore total, nitrates et calcium estimés aux stations de la 3e Petite Rivière- Pot-au-Beurre et de la Petite-Rivière-Bellevue du réseau Lavallière pour la période d'évaluation 2013-2014.

Rappelons par ailleurs que l'estimation des charges de nutriments au moyen de modèles concentration : débit indépendants aux deux bassins n'est pas adapté à la détection d'effet de la période. Cette détection est plutôt supportée au moyen de l'approche d'analyse de covariance (ANCOVA), qui prend en compte les observations de la période de référence dans l'explication des gradients en période d'évaluation. Ces résultats sont présentés au Tableau 12 et illustrés en figure 21. En résumé, aucun effet significatif de la période n'est détecté sur les flux et les concentrations en phosphore total et dissous. Compte tenu de la dominance particulière du phosphore dans la spéciation du P exporté des deux bassins, l'absence de détection d'effet des travaux hydro-agricoles sur le flux de phosphore est cohérent avec l'absence de gradient significatif détecté pour les flux de MES.

Calcium.

L'estimation des flux de calcium (Ca) témoigne de CV de sous les 8%. Un ajustement aussi satisfaisant des modèles dans les deux bassins indique que les relations entre les concentrations en Ca et les débits des ruisseaux sont bien définies. La qualité du modèle reflète notamment que la concentration en calcium des eaux des rivières est soustraite aux effets d'hystérésis, à l'instar des signaux de conductivité électrique en fonction du débit des deux ruisseaux évoqué antérieurement. La concentration moyenne en Ca pondérée pour le débit au bassin de la 3ePRPB (73-76 mg l⁻¹) demeure cependant deux fois plus élevée qu'au bassin de la PRB (31-33 mg l⁻¹). Ce ratio dans les concentrations en Ca des deux bassins demeure inchangé de la période de référence à la période d'évaluation. Il en va de même pour la conductivité électrique de l'eau aux exutoires des bassins, utilisée pour la séparation des hydrogrammes, et fortement corrélée aux concentrations de calcium. Cette relative stabilité dans les concentrations et les flux de Ca en fonction du débit entre les périodes est attendue, puisqu'elle témoigne des répartitions des écoulements de surface et souterrain propres à chaque bassin. Les concentrations systématiquement plus élevées au bassin de la 3ePRPB témoignent plutôt de la présence relativement plus importante de matériaux parentaux calcaires qu'au bassin PRB, tel que rapporté précédemment au Tableau 3.

L'analyse de covariance (ANCOVA) des concentrations instantanées en calcium témoigne par ailleurs d'une corrélation très étroite avec les débits respectifs des ruisseaux. Aucune différence significative n'est détectée entre la période de référence et d'évaluation pour ce paramètre (Tableau 12). Tel qu'illustrée en figure 21, les différences dans les flux de Ca des bassins entre les périodes sont reflétés par un modèle ANCOVA à pentes distinctes, qui indique que les différences dans les flux sont influencées par les conditions hydrologiques.

En étiage, (D10 du flux référence du PRB=52 g Ca ha⁻¹ jr⁻¹) le flux instantané de Ca en période d'évaluation au bassin 3ePRPB est en augmentation de 72% (142 g Ca ha⁻¹ jr⁻¹) par rapport à la période de référence (82 g Ca ha⁻¹ jr⁻¹). En crue (D90 du flux référence du PRB=2,630 g Ca ha⁻¹ jr⁻¹), une réduction significative de 32% du flux instantané de Ca est plutôt détectée, soit de 4,560 g Ca ha⁻¹ jr⁻¹ en période de référence à 3,100 g Ca ha⁻¹ jr⁻¹ en période d'évaluation (Figure 21). Les flux instantanés de Ca en hausse dans la strate d'écoulement de base et à la baisse dans la strate de crue reflètent essentiellement le gradient détecté dans les débits hebdomadaires (Tableau 10; Figure 18) et les débits instantanés (Tableau 12). L'augmentation significative de l'écoulement de base du ruisseau, suivant les travaux d'entretien du cours d'eau, entraîne à la hausse le flux de Ca en conditions de faibles débits. L'atténuation des crues, résultant aussi des travaux réalisés dans le cours d'eau, réduit

pour sa part le flux de Ca associés aux débits de pointe. Au final, le bilan des charges de Ca entre les périodes demeure inchangé, de même que les concentrations et les flux médians instantanés de Ca, tel que rapporté au Tableau 12.

Nitrates.

L'ajustement des modèles d'estimations des flux de nitrates en période d'évaluation au bassin de la 3ePRPB (CV=0,11) et de la PRB (CV=0,15) est satisfaisant (Tableau 11). Le flux et la concentration moyenne pondérée pour le débit en nitrates à la station de la 3ePRPB demeure deux fois plus élevée qu'à la station de la PRB. Ce ratio reflète celui observé en période de référence (Tableau 11). Compte tenu de la densité d'élevage sensiblement plus élevée dans le bassin de la PRB, la charge plus importante de nitrates à l'exutoire du bassin de la 3ePRPB est attribuée principalement aux sources de fertilisation minérale. Cette exportation relativement plus élevée dans le bassin de la 3ePRPB y témoigne du potentiel de rationaliser la fertilisation azotée. En marge du projet de l'Observatoire de la qualité de l'eau, le projet REZOTAGE (Michaud et al., 2014b) réalisé en partie dans un réseau de ferme du bassin versant de la Baie Lavallière a démontré la pertinence de réduire les apports de fertilisation azotée dans la majorité des parcelles à l'étude. Rappelons enfin que la hauteur d'eau drainée au bassin de la 3ePRPB, relativement plus importante que celle du bassin de la PRB, favorise un entraînement des nitrates plus important. Un nouveau projet de recherche initié par l'IRDA (Michaud et al., 2015) en collaboration avec le CCAE Lavallière se penche sur le drainage contrôlé comme mesure d'atténuation complémentaire à la réduction des exportations de nutriments au drain.

4 CONCLUSION

Entre 2009 et 2014, les suivis hydrologiques mis en place aux exutoires des bassins versants des ruisseaux de la 3e Petite Rivière Pot-au-Beurre (3ePRPB) et de la Petite Rivière Bellevue (PRB) ont permis de décrire de façon détaillée les cheminements de surface et souterrain des eaux, de même que les mobilisations de sédiments, de phosphore et d'azote au pas de temps de 15 minutes, l'année durant. Des différences marquées dans les réponses hydrologiques des micro-bassins à l'étude ont été observées, reflétant la morphologie des cours d'eau, les propriétés des sols et les systèmes de culture.

Le ruisseau de la 3e Petite Rivière Pot-au-Beurre se distingue par un faible taux de ruissellement de surface, soit le plus faible observé pour l'ensemble des neuf bassins de l'*Observatoire* en sol minéral. Malgré une activité hydrologique de surface modérée, le taux d'exportation de sédiments de la 3e Petite Rivière Pot-au-Beurre demeure néanmoins presque deux fois plus élevé qu'à la Petite Rivière Bellevue pour l'ensemble de la période d'étude. L'occupation du sol plus intensive dans la 3ePRPB contribue à la vulnérabilité accrue du bassin aux processus d'érosion. Le taux d'exportation de sédiments plus élevé est également attribué aux décrochements de berge et au ravinement dans la partie méandreuse du cours d'eau, dans sa portion aval. Les puissances hydrauliques générées dans le cours d'eau font en sorte que près du quart de la section méandreuse des rives de la 3ePRPB présente des migrations, correspondantes à une vitesse moyenne de 0,147 m an⁻¹. Quant à la Petite Bellevue, seulement 2% des 18 km de rivière témoignent de migrations, pour une vitesse moyenne d'environ 0.10 m an⁻¹.

Les deux principales branches de cours d'eau du secteur amont de la 3ePRPB ont profité de travaux d'entretien et de l'aménagement d'une bande riveraine élargie longeant les branches fraîchement excavées. L'analyse des débits et de la qualité de l'eau avant et après intervention témoigne d'un effet de l'aménagement hydro-agricole sur les débits et le parcours des eaux. L'augmentation des débits de base de la 3ePRPB, particulièrement en saison de production (mai-novembre) traduit une efficacité accrue du drainage souterrain, suivant l'enlèvement des sédiments accumulés dans le cours d'eau. Cette évacuation souterraine plus efficace des eaux excédentaires a aussi favorisé le laminage des crues en saison de production. L'efficacité accrue des systèmes de drainage souterrain suivant l'entretien du cours d'eau se reflète également dans les signaux de conductivité électrique des ruisseaux et leurs flux de calcium.

Aucune différence n'est détectée dans les flux de sédiments de la 3ePRPB entre la période de référence, précédent les travaux, et la période d'évaluation. Le même constat découle de l'étude des concentrations en MES des échantillons d'eau prélevés ponctuellement et dosés en laboratoire, et du sondage continu des signaux de turbidité des ruisseaux. La cohérence de ces résultats, découlant de dispositifs de mesure indépendants, renforce le constat que les travaux d'entretien des cours d'eau et d'aménagement riverain dans le secteur amont du bassin de la 3ePRPB n'ont eu qu'un effet marginal sur le flux total de sédiments à l'exutoire du bassin. L'absence d'effet significatif sur l'exportation de sédiments est cohérente avec les diagnostics d'érosion et le portrait hydrogéomorphologique de la zone d'étude, qui situent les principaux foyers d'érosion plus en aval.

La réduction des charges de sédiments à la Baie Lavallière demeure un important enjeu pour la communauté et la mise en valeur écologique du milieu humide. En première ligne de défense agroenvironnementale, l'application systématique des pratiques culturales anti-érosives est à privilégier. Dans la zone d'étude, la culture sur résidus tend à se généraliser dans les cultures annuelles. Une proportion importante de ces superficies, notamment en culture de soya, demeure cependant vulnérable à la fin de l'automne aux phénomènes d'érosion en raison d'un faible couvert de résidus. La production de foin de qualité, de céréales de printemps grainées et de céréales d'hiver présente autant d'opportunités pour assurer la protection du sol lors des redoux hivernaux et du flush printanier du ruissellement de surface. L'introduction de cultures de couverture est aussi une avenue qui a démontré son efficacité ailleurs au Québec dans la prévention de l'érosion et la promotion d'une bonne qualité du profil cultural.

En deuxième ligne, la sévérité des problèmes d'érosion riveraine dans le secteur aval de la 3ePRPB et ailleurs dans le bassin versant de la Baie Lavallière appellent à des solutions efficaces et novatrices en matière d'aménagement hydro-agricole. Bien que la présente étude n'avait pas le mandat de formuler des recommandations à l'égard de l'encadrement technique, financier et réglementaire d'une telle démarche, retenons cependant que les relevés du milieu hydrique et terrestre colligés dans le cadre de l'*Observatoire* constituent un important jalon vers la planification d'un aménagement sur mesure et innovateur du secteur aval de la 3^e Petite rivière Pot-au-beurre. Le site se prêterait bien à la réalisation d'un projet pilote d'action concertée dans l'aménagement intégré et durable du cours d'eau, de ses rives et ses champs, inspiré par le concept d'espace de liberté des cours d'eau. Les suivis hydrologiques réalisés dans le cadre de l'*Observatoire* offrent par ailleurs des balises précises dans l'évaluation des effets d'une éventuelle action concertée sur l'hydrologie du bassin versant et ses flux de sédiments et de nutriments.

5 RÉFÉRENCES CITÉES

- Belvisi, J., G. Paré, J. Deslandes, I. Beaudin, I. Saint-Laurent, G. Poisson, et A.R. Michaud. 2009. Atlas électronique du bassin versant de la rivière Yamaska. Géomont, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Union des producteurs agricoles, Université de Sherbrooke (CARTEL) et COGEBY.
- Biron, P. 2013. Communication électronique personnelle. Professeure agrégée, Université Concordia.
- Géomont et MAPAQ (Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Pêcheries du Québec). 2011. Info-Sols, Montérégie-Est. www.geomont.qc.ca/info-sols
- Giroux, M., M. Duchemin, A. R. Michaud, I. Beaudin, C. Landry et M.R. Laverdière. 2008. Relation entre les concentrations en phosphore particulaire et dissous dans les eaux de ruissellement et les teneurs en P total et assimilable des sols pour différentes cultures. *Agrosolutions* 19(1) :Pp 4-14.
- Grabow, G.L., J. Spooner, L.A. Lombardo, and D.E. Lione. 1999. Detecting water quality changes before and after BMP implementation : Use of SAS for statistical analyses. *NEQEP Notes*, N° 93, North Carolina State Water Quality Group Newsletter, NCSU, Raleigh, NC.
- Greenberg, E.A., L.S. Clesceri et A.D. Eaton. 1992a. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C. Standard method for examination of waste and waster water, 18th edition, pp 2-56.
- Greenberg, E.A., L.S. Clesceri et A.D. Eaton. 1992b. Persulfate Digestion Method. Standard method for examination of waste and waster water, 18th edition, pp 4-112.
- Greenberg, A.E., S. Lenore et S. Clesceri. 1992c. No: 4500-NH3 H. Automated Phenate Method, p. 4-84; No: 4500-NO3- F. Automated Cadmium Reduction Method, p. 4-84, In E. A.D., ed. Standard Methods For Examination of Waste and Waste Water, 18th Edition ed. Corporation Tarrytown, N.Y. 10591.
- Greenberg, A.E., S. Lenore et S. Clesceri. 1992d. No: 3030 A, Preliminary Treatment of Samples, p. 3-3, No: 3120, Metals by Plasma Emission Spectroscopy, p. 3-34 – 3-40, In E. A.D., ed. Standard Methods For Examination of Waste and Waste Water, 18th Edition ed. Corporation Tarrytown, N.Y. 10591.
- Laferrrière, B. 2014. Communication personnelle.
- La Financière. 2013. Bases de données des cultures généralisées.
- 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., Lauzier, R., et M.R.Laverdière. 2005. Mobilité du phosphore et intervention agroenvironnementale en bassin versant agricole: Etude de cas du bassin versant du ruisseau au Castor, tributaire de la rivière aux Brochets, Québec. *Agrosol* 16(1), pp. 57-59. https://irda.blob.core.windows.net/media/2328/michaud-et-al-2005_article_agrosol_mobilite_p_bv_castor.pdf
- Michaud, A.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009a. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), MAPAQ, Club du bassin La Guerre, Dura-Club, Club de fertilisation de la Beauce, Fonds d'action québécois pour le développement durable, Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec et Programme d'aide technique de Couverture végétale du Canada. Québec, Québec, 155 p. https://irda.blob.core.windows.net/media/2336/michaud-et-al-2009_rapport_reseau_actions_concertees_bv_agricoles.pdf

- Michaud, A.R., J. Desjardins, M. Grenier et R. Lauzier. 2009b. Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et au Castor – Dans le cadre du projet Lisière verte. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets, AAC (PASCAA) et MAPAQ, Québec, Québec, 27 p. <https://irda.blob.core.windows.net/media/2337/michaud-et-al-2009-rapport-suivi-lisiere-verte-ewing-castors.pdf>
- Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012a. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport sommaire pour la période de référence 2009-2011. Rapport réalisé dans le cadre du projet Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Québec, Canada. 87 pages et annexes.
- Michaud, A.R., A. Drouin, J. Desjardins, N. Coté. 2012b. Rapport final sur le rendement pour la période 2009-2013 pour les bassins versants du ruisseau Fourchette et du Bras D'Henri. Programme d'évaluations des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle du bassin hydrographique. Agriculture et agroalimentaire Canada. Accord de contribution 1585-10-3-2-5-1. 68 pages avec annexes.
- Michaud, A. R., N.-R. Rocha Medrano, R. Lagacé et A. Drouin. 2014a. Développement et validation de méthodes de prédiction du ruissellement et des débits de pointe en support à l'aménagement hydro-agricole. Rapport final présenté au CDAQ dans le cadre du PCAA. IRDA. 142 p. <https://irda.blob.core.windows.net/media/2342/michaud-et-al-2014-rapport-prediction-ruissellement-ouvrages-hydro-agricoles.pdf>
- Michaud, A.R., A. Drouin, I. Beaudin, L. Belzile, M.-O. Gasser, J. Desjardins et N. Côté. 2014b. REZOTAGE: Réalisation de ZOnes Technico-économiques Agricoles de Gestion. Rapport final. Projet réalisé dans le cadre du Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA) en collaboration avec le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada. 180 p. (11,5 Mo). <https://irda.blob.core.windows.net/media/2341/michaud-et-al-2014-rapport-final-rezotage.pdf>
- Michaud, A.R., M. MacRae, C. Madramootoo, J. Whalen, B. Gauvin St-Denis, C. Merkley, B. Laferrière et A. Jamieson. 2015. Gestion de l'eau de drainage souterrain pour maximiser la production des cultures, l'utilisation des nutriments et la disponibilité de l'eau avec les climats actuels et futurs. Programme Innov'Action de coopération Québec-Ontario pour la recherche en agroalimentaire. Projet IA114252. <https://irda.blob.core.windows.net/media/5487/michaud-et-al-2018-managing-subsurface-drainage-water-to-optimize-crop-productivity-nutrient-use-and-water-availability-in-contemporary-and-future-climate-report.pdf>
- Murphy, J., et J.R. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphates in surface waters. *Anal. Acta* 27:31-36.
- Roux, C. 2012. Portrait hydrogéomorphologique d'un bassin versant agricole et processus de re-méandrisation des cours d'eau. Le cas de la Baie Lavallière au Québec. Rapport de stage de fin de maîtrise. Université Claude Bernard Lyon 1, France. Codirections P. Biron, U. Concordia, A. Michaud, IRDA et S. Doppler, Lyon-1. .
- Sunborg, M., A.R. Michaud, J. Deslandes et R. Fournier. 2009. Diagnostic d'érosion hydrique au moyen d'indices spatiaux dérivés de données LiDAR. 62e congrès annuel de l'Association canadienne des ressources hydriques, Loews Le Concorde, Québec. Juin.
- Sharpley, A.N., W.W. Troeger et S.J. Smith. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *J. Env. Qual.* 20:235-238.
- Walker, W. 1998. Flux, *Stream loads computations, version 5.0*. Environmental laboratory USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi, USA.
- WHO (World Health Organization). 2008. World Health Statistics 2008. World Health Organization. 112 p. <http://www.who.int/whosis/whostat/2008/en/index.html>

Annexe 1. Diagnostic de l'état des rives de la 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre, bassin Intervention du réseau Lavallière de l'Observatoire.

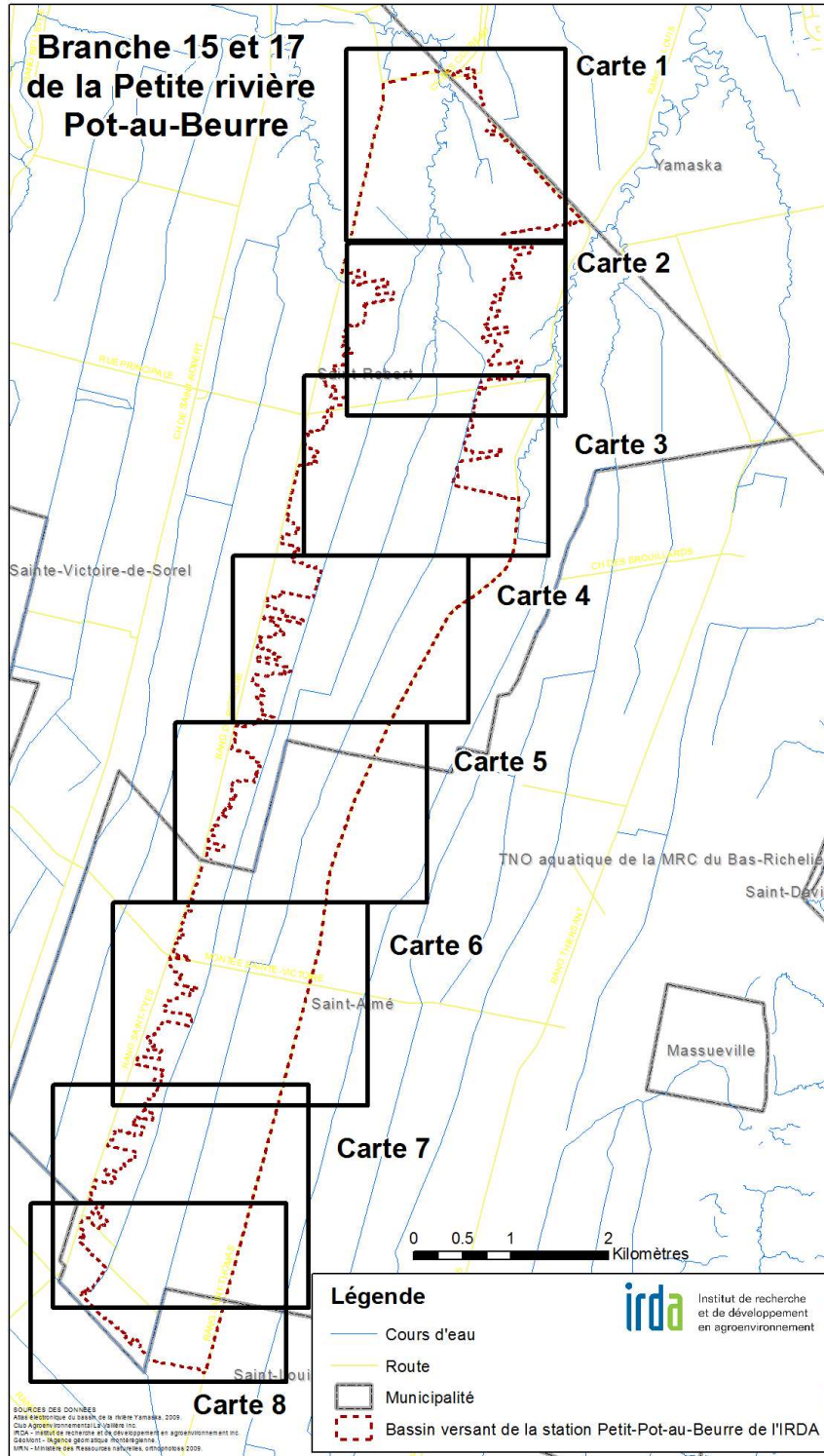


Figure A1.1. Localisation des cartes 1 à 8 des diagnostics riverains de la 3^e Petite rivière Pot-au-Beurre.

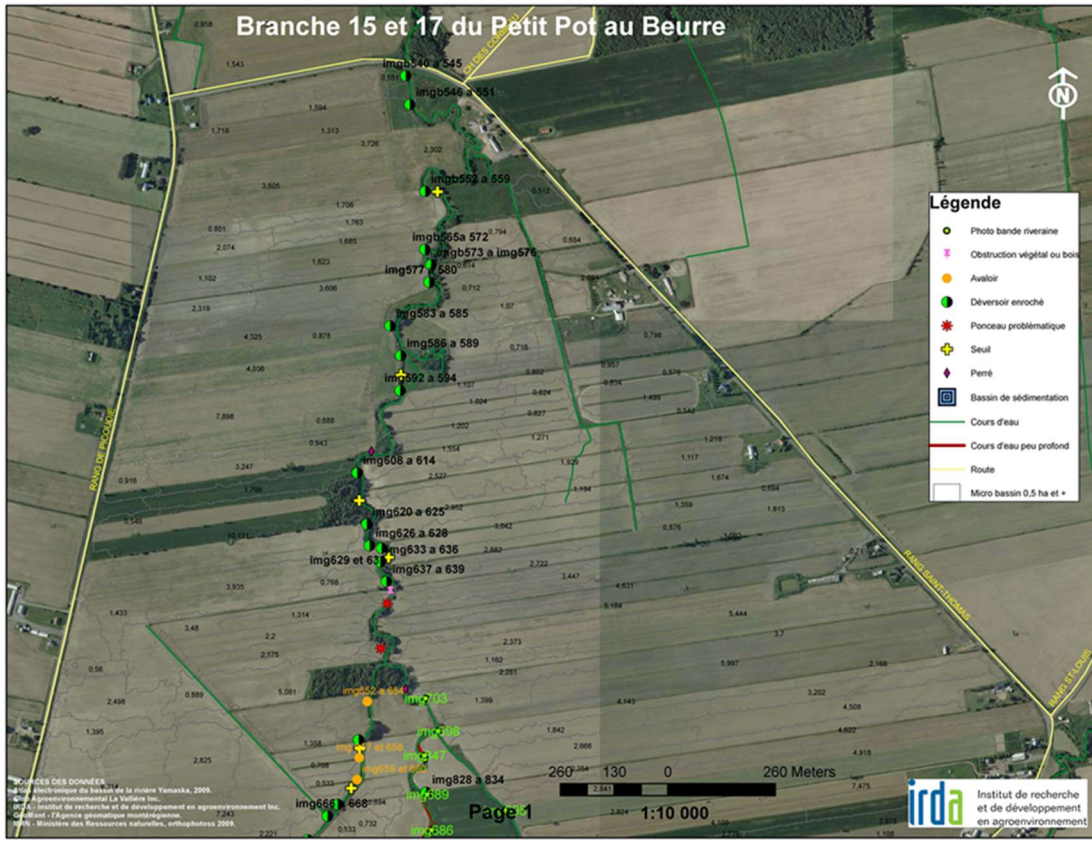


Figure A1.2. Carte des diagnostics riverains de la 3e Petite rivière Pot-au-Beurre – Page 1.

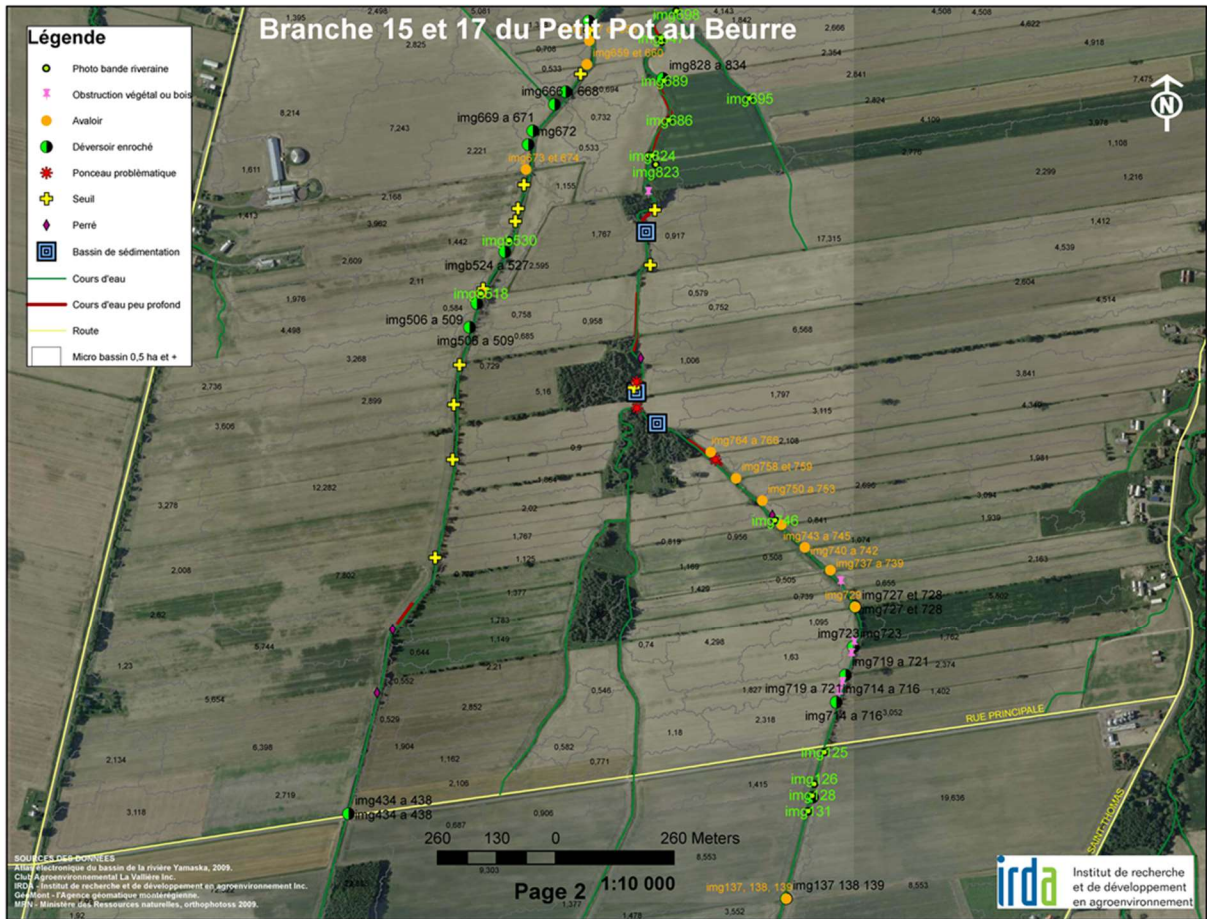


Figure A1.3. Carte des diagnostics riverains de la 3e Petite rivière Pot-au-Beurre – Page 2.

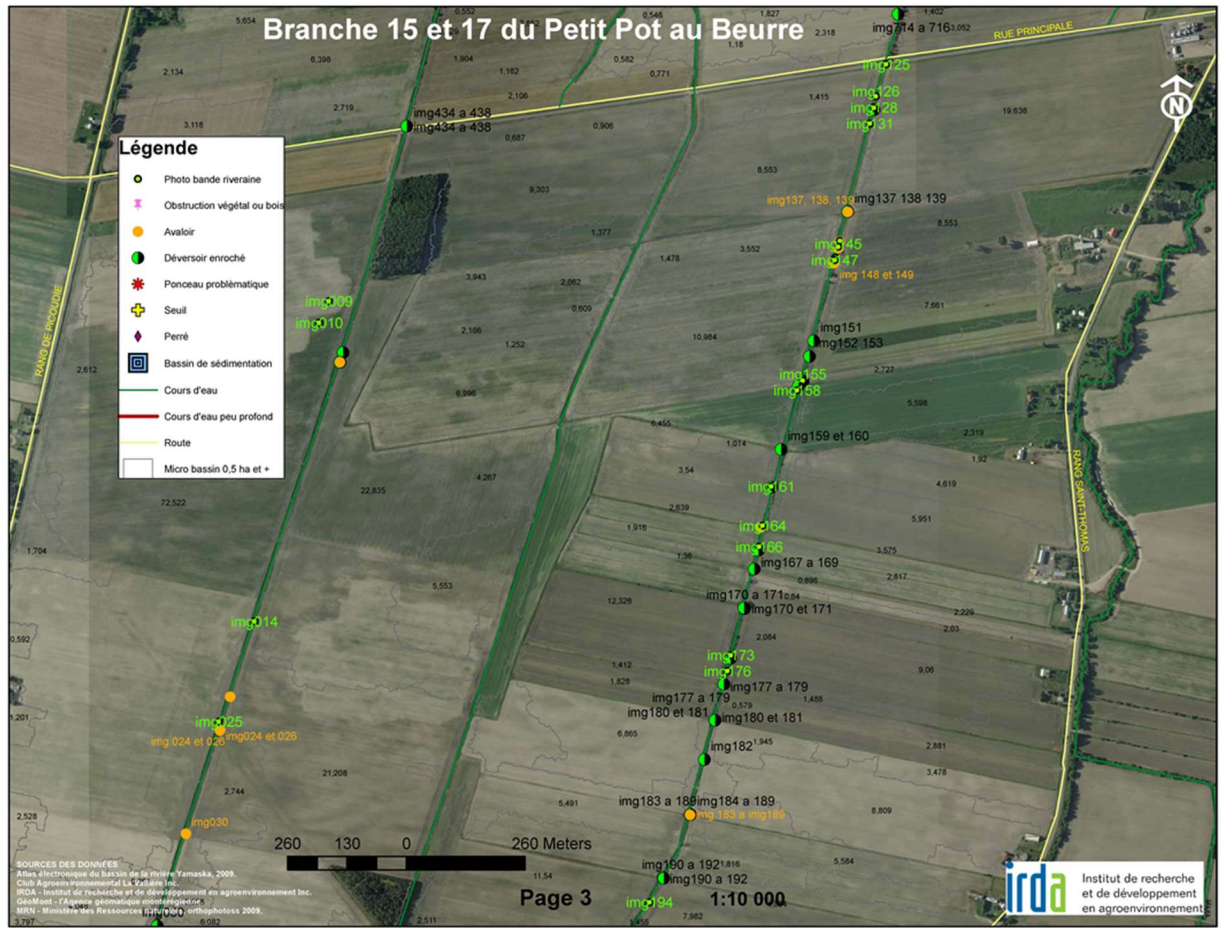


Figure A1.4. Carte des diagnostics riverains de la 3e Petite rivière Pot-au-Beurre – Page 3.

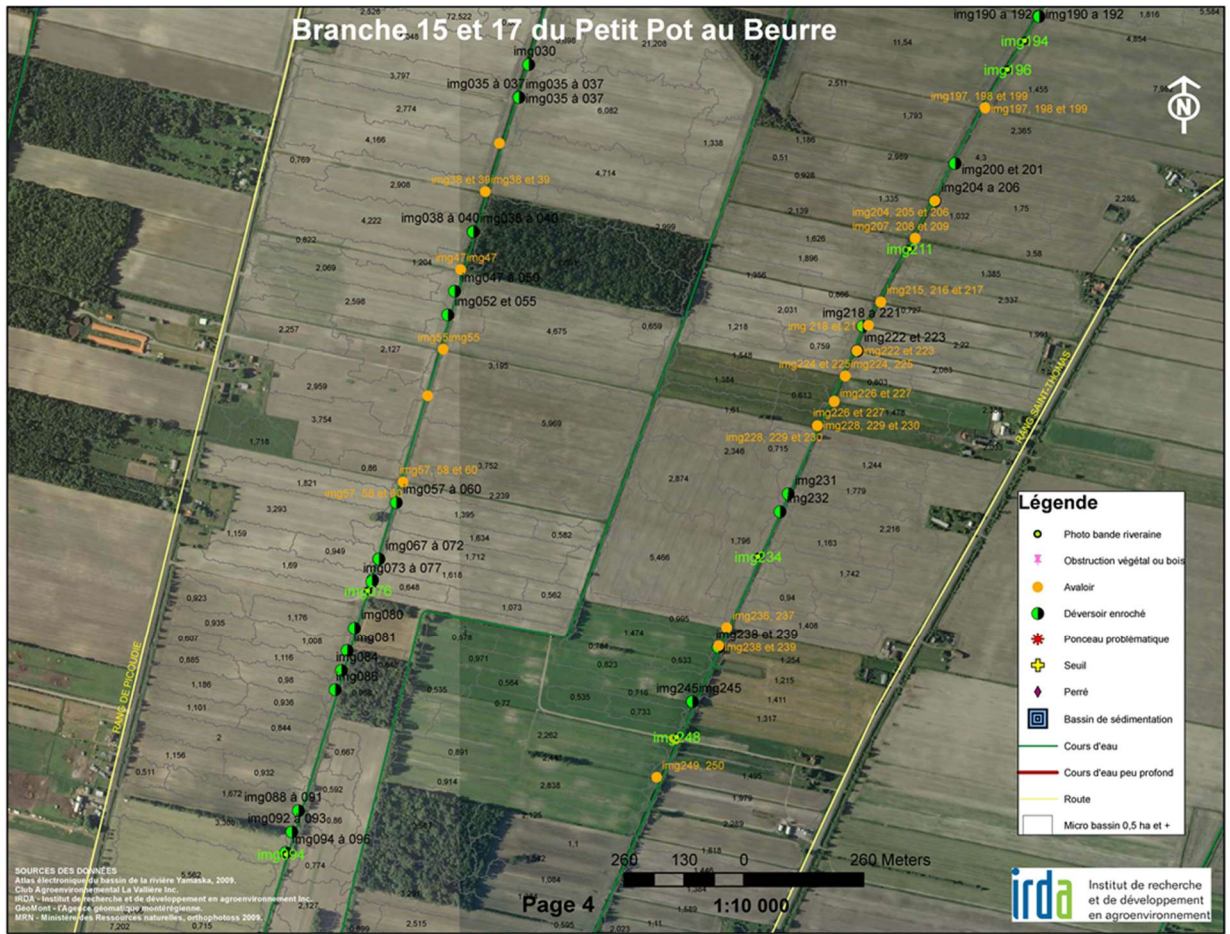


Figure A1.5. Carte des diagnostics riverains de la 3e Petite rivière Pot-au-Beurre – Page 4.

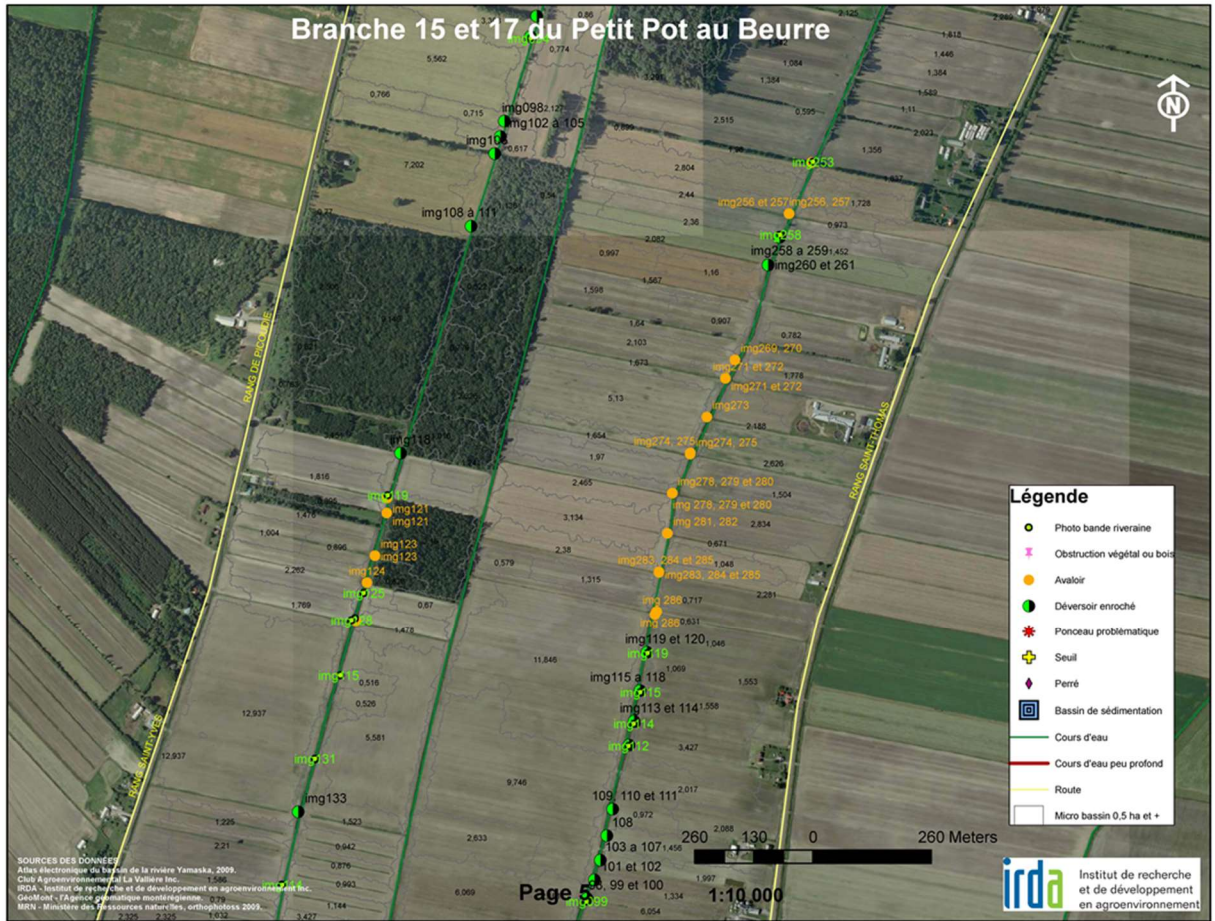


Figure A1.6. Carte des diagnostics riverains de la 3e Petite rivière Pot-au-Beurre – Page 5.

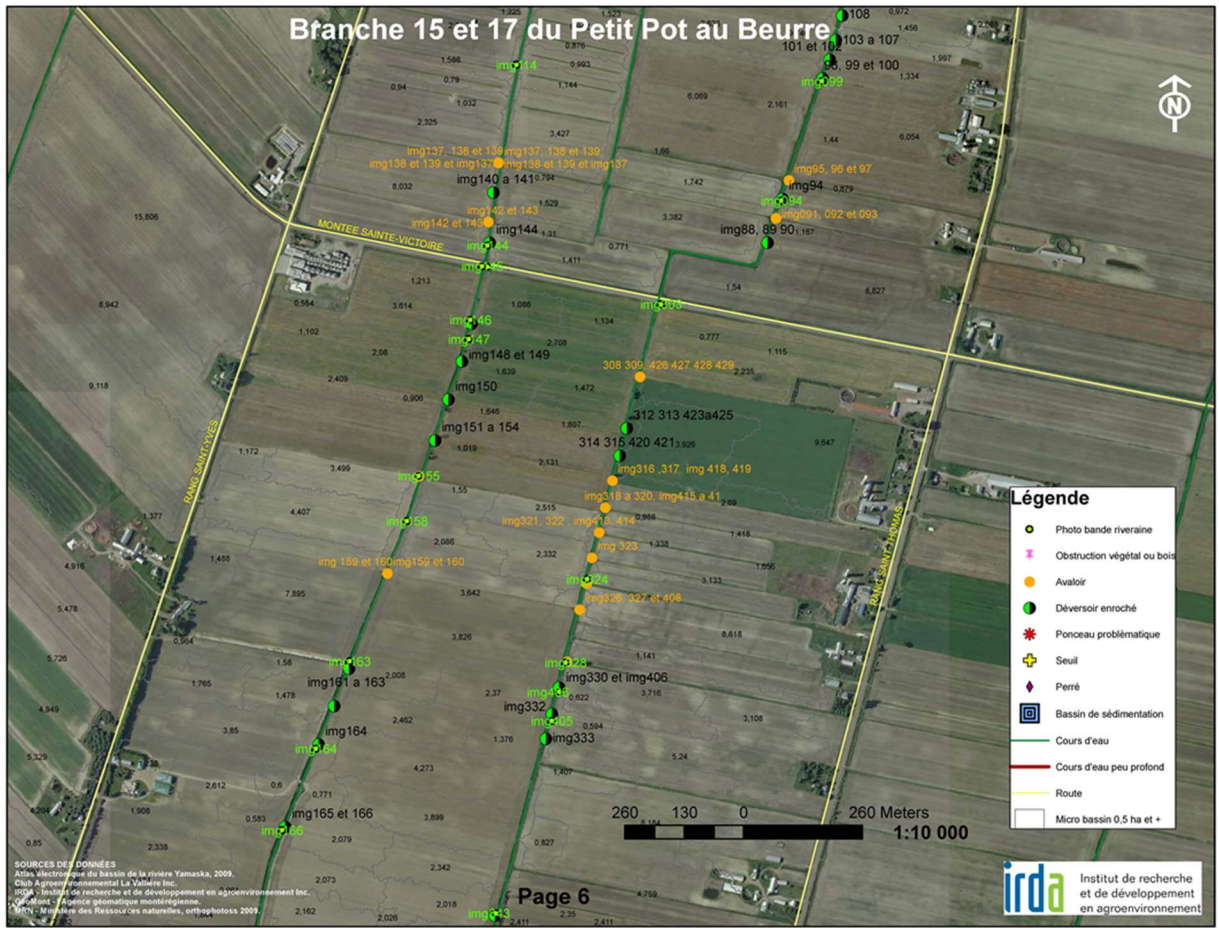


Figure A1.7. Carte des diagnostics riverains de la 3e Petite rivière Pot-au-Beurre – Page 6.

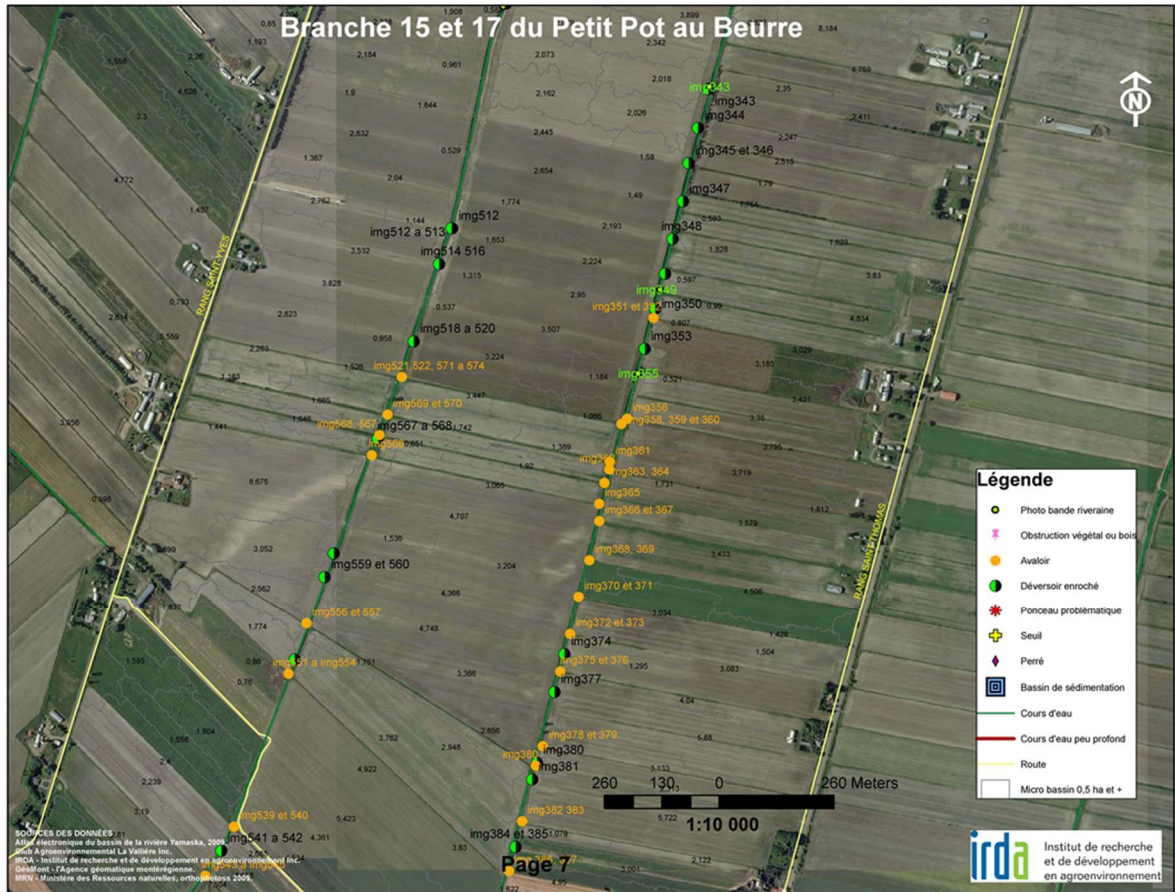


Figure A1.8. Carte des diagnostics riverains de la 3e Petite rivière Pot-au-Beurre – Page 7.

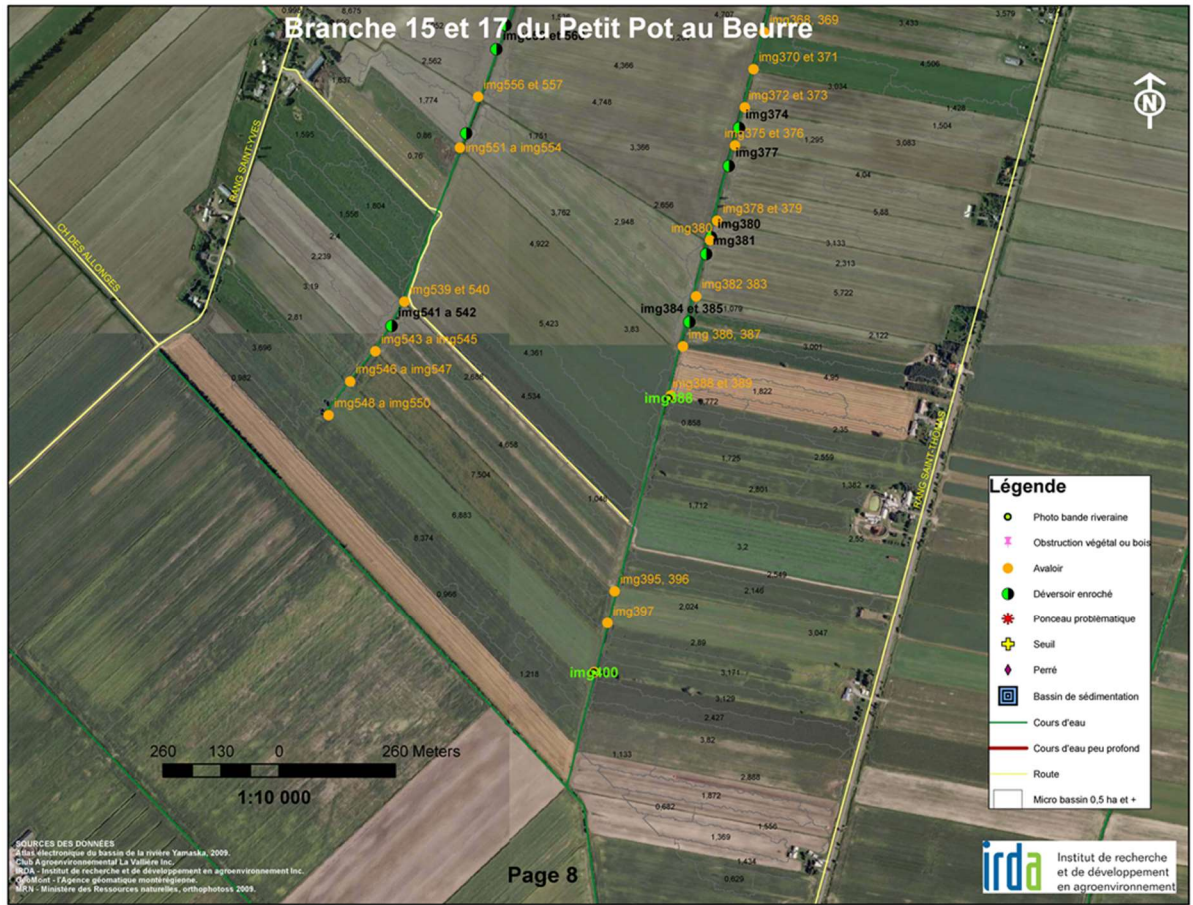


Figure A1.9. Carte des diagnostics riverains de la 3e Petite rivière Pot-au-Beurre – Page 8.