

RAPPORT FINAL

RÉSEAU D' ACTIONS CONCERTÉES EN BASSINS VERSANTS AGRICOLES

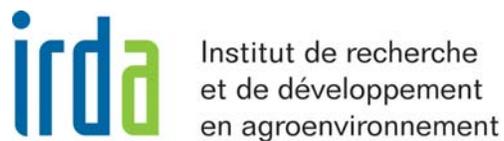
Projet de recherche et développement présenté au
Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec

(Projet no.6009)



Préparé par:

Aubert Michaud, IRDA
Julie Deslandes, IRDA
Jacques Desjardins, IRDA
Michèle Grenier, IRDA



En Partenariat avec:



Avec la participation de :
- ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
- ministère de l'Environnement



Québec, Août 2009

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Institut de recherche et développement en agroenvironnement

Aubert Michaud, Coordonnateur de projet

Julie Deslandes, Géomatique et télédétection

Jacques Desjardins, Monitoring et aménagements hydro-agricoles

Michèle Grenier, bio-statistique

Pierre Audesse et l'équipe du laboratoire de physico-chimie de l'IRDA

Michel Noël et l'équipe technique de la Station de recherche de Saint-Lambert-de-Lauzon de l'IRDA

Club de fertilisation de la Beauce

Véronique Samson

Line Lamonde

Marielle Laferrière

Les producteurs et les bénévoles des bassins versants du réseau Fourchette

Club du bassin LaGuerre

Sylvie Thibeau

François Cadrin

Sylvain Gascon

Les producteurs et les bénévoles des bassins versants du réseau La Guerre

Dura-Club

Evelyne Barriault

Elizabeth Vachon

Les producteurs et les bénévoles des bassins versants du réseau Walbridge

Ministère de l'agriculture, pêcheries et de l'alimentation du Québec

Direction régionale de Chaudières-Appalaches

Donald Lemelin

Armand Gagnon

Annie Goudreau

Direction régionale de la Montérégie, Secteur Est

Richard Lauzier

Roger Rivest

Mireille Molleur

Germain Pinard

Direction régionale de la Montérégie, Secteur Ouest

Robert Beaulieu

Louis-Claude Lavoie

Jean Filiatrault

Direction de l'environnement et du développement durable

Richard Laroche

Centre d'Expertise hydrique du Québec

François Godin

Jacques Lacasse

L'équipe technique du CEHQ

Le document peut être cité comme suit :

Michaud, A.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Québec, Québec, 155 p.

Ce projet a été réalisé avec le support financier du Fonds québécois pour le développement durable, du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec et du programme d'aide technique de Couverture végétale du Canada.

Table des matières

Liste des tableaux.....	6
Liste des figures.....	8
1 DESCRIPTION DU PROJET.....	10
1.1 Objectifs.....	10
1.2 Méthodologie.....	10
1.2.1 Sélection des bassins versants.....	12
1.2.2 Diagnostic et aménagement hydro-agricole.....	13
1.2.3 Bilans agronomiques.....	14
1.2.4 Monitoring aux exutoires des bassins.....	15
1.2.4.1 Relevés météorologiques et hydrométriques.....	15
1.2.4.2 Échantillonnages ponctuels et dosages analytiques.....	16
1.2.4.3 Sondes multi-paramètres.....	17
1.2.5 Traitements statistiques.....	19
1.2.5.1 Estimations des flux de sédiments et nutriments.....	19
1.2.5.2 Détection de réponses de la qualité de l'eau aux actions concertées.....	20
2 RÉSULTATS ET ANALYSE.....	23
2.1 Ruisseau Fourchette.....	25
2.1.1 Diagnostic et aménagement hydro-agricole.....	26
2.1.2 Bilan agronomique.....	28
2.1.3 Bilan hydrique.....	29
2.1.4 Flux de sédiments et nutriments.....	32
2.1.5 Réponse de la qualité de l'eau à l'action concertée.....	35
2.2 Ruisseau Walbridge.....	39
2.2.1 Diagnostic et aménagement hydro-agricole.....	41
2.2.2 Bilan agronomique.....	43
2.2.3 Bilan hydrique.....	44
2.2.4 Flux de sédiments et nutriments.....	47
2.2.5 Réponse de la qualité de l'eau à l'action concertée.....	53
2.3 Rivière La Guerre.....	58
2.3.1 Diagnostic et aménagement hydro-agricole.....	60
2.3.2 Bilan agronomique.....	62
2.3.3 Bilan hydrique.....	63
2.3.4 Flux de sédiments et nutriments.....	66
2.3.5 Réponse de la qualité de l'eau à l'action concertée.....	71
2.4 Analyse technico-économique.....	77
2.5 Impacts du réseau.....	80
2.5.1 Développement de méthodes et d'outils de diagnostic agroenvironnemental.....	80
2.5.1.1 Télédétection et atlas agroenvironnementaux.....	80
2.5.1.2 Analyses hydrologiques.....	82
2.5.1.3 Mesure des flux de sédiments et nutriments.....	83
2.5.1.4 Détection de réponse de la qualité de l'eau aux actions agroenvironnementales.....	83
2.5.1.5 Modélisation hydrologique.....	84

2.5.2	Action collective et qualité du milieu	84
3	DIFFUSION DES RÉSULTATS	88
4	HISTOIRE D'UNE RÉUSSITE	89
5	PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES	91
6	RÉFÉRENCES	91
	Annexe I. Principales caractéristiques biophysiques des bassins versants expérimentaux	94
	Annexe II. Microtopographie et parcours de l'eau des bassins intervention du réseau....	97
	Annexe III. Indice de brillance des sols des bassins intervention du réseau dérivé des images multispectrales	100
	Annexe IV. Description des données agronomiques utilisées	103
	Annexe V. Suivi hydrométrique et de la qualité de l'eau aux exutoires des bassins versants expérimentaux.....	104
	Annexe VI. Coûts et bénéfices associés aux aménagements.	148
	Annexe VII. Photographies des aménagements.....	151

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant du ruisseau Fourchette. .	28
Tableau 2. Bilan agronomique des bassins versants expérimentaux du ruisseau Fourchette pour la période de référence et d'évaluation.	29
Tableau 3. Durée et hauteurs des lames d'eau exportées correspondantes aux strates de débits retenues pour le calcul des flux aux bassins Témoin et Intervention du ruisseau Fourchette.	30
Tableau 4. Segmentation des lames d'eau en composantes de surface et souterraine sur la base des signaux géochimiques captés par les sondes multiparamètres aux exutoires des bassins Intervention et Témoin du ruisseau Fourchette pour les années de référence 2005 et 2006.	32
Tableau 5. Concentrations moyennes pondérées pour le débit et les charges exportées de matières en suspension et de nutriments aux exutoires des bassins versants expérimentaux Fourchette, Intervention et Témoin, pour la période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).	32
Tableau 6. Valeurs F et probabilités associées aux effets et interactions du modèle d'analyse de covariance appliquées aux observations de qualité de l'eau de la strate de débits de crue (débit journalier > 1,4 mm/jour) du bassin Fourchette Intervention utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.	37
Tableau 7. Moyennes (anti-log) ajustées au modèle de covariance des observations de qualité de l'eau de la strate de débits de crue (débit journalier > 1,4 mm/jour) du bassin Fourchette Intervention utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.	37
Tableau 8. Aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant Intervention du ruisseau Walbridge.	42
Tableau 9. Bilan agronomique des bassins versants expérimentaux du ruisseau Walbridge pour les périodes de référence et d'évaluation.	44
Tableau 10. Durée et hauteurs des lames d'eau exportées correspondant aux strates retenues pour le calcul des flux aux bassins Témoin et Intervention du ruisseau Walbridge.	45
Tableau 11. Précipitations et hauteurs d'eau exportées totales et associées aux transferts souterrains aux exutoires des bassins versants Walbridge Témoin et Intervention.	46
Tableau 12. Concentrations moyennes pondérées pour le débit et charges exportées de matières en suspension et de nutriments aux exutoires des bassins versants expérimentaux Walbridge, Intervention et Témoin, pour la période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).	48
Tableau 13. Valeurs F et probabilités associées aux effets et interactions du modèle d'analyse de covariance appliquées aux observations de qualité de l'eau de la strate de débits de crue (débit journalier > 1,4 mm/jour) du bassin Walbridge Intervention utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.	54
Tableau 14. Moyennes (anti-log) ajustées au modèle de covariance des observations de qualité de l'eau de la strate de débits de crue (débit journalier > 1,4 mm/jour) du bassin Walbridge Intervention utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.	56
Tableau 15. Aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant Intervention de la rivière La Guerre.	61

Tableau 16. Bilan agronomique des bassins versants expérimentaux de la rivière La Guerre pour les périodes de référence et d'évaluation.	63
Tableau 17. Durée et hauteurs des lames d'eau exportée correspondant aux strates retenues pour le calcul des flux aux bassins Témoin et Intervention de la rivière La Guerre.	65
Tableau 18. Concentrations moyennes pondérées pour le débit et charges exportées de matières en suspension et de nutriments aux exutoires des bassins versants expérimentaux de la rivière La Guerre, Intervention et Témoin, pour la période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2005-2006).....	67
Tableau 19. Valeurs F et probabilités associées aux effets et interactions du modèle d'analyse de covariance appliquées aux flux hebdomadaires du bassin Intervention La Guerre utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.....	73
Tableau 20. Moyennes (anti-log) ajustées au modèle de covariance des observations de flux hebdomadaires du bassin Intervention La Guerre utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.	73
Tableau 21. Investissements et retombés économiques dans la gestion et l'entretien du réseau hydrographique suite aux aménagements de 2003 - 2004 dans les 3 bassins d'Interventions.	79
Tableau 22. Bilan hydrique et flux spécifiques de sédiments et de nutriments estimés aux exutoires des bassins versants Témoin et Intervention du ruisseau Fourchette, du ruisseau Walbridge et de la rivière La Guerre en période de référence (2001-2003) et en période d'évaluation (2004-2006).	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Superficie et utilisation du sol des bassins versants expérimentaux du réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles.	12
Figure 2. Modèle numérique d'élévation (a), patron spatial du parcours des eaux de ruissellement (b) et indice de brillance du sol dérivé de l'image multi-spectrale (c) d'un secteur du bassin versant Intervention du ruisseau Walbridge. La position basse du relief et la concentration du parcours de l'eau explique ici la présence d'une zone mal égouttée du parcellaire.....	13
Figure 3. Dispositif de suivi hydrométrique et de qualité de l'eau incluant le limnimètre et le jaugeage du débit (a), la sonde multi-paramètres à mobilité verticale (b) et l'échantillonnage ponctuel (c).	16
Figure 4. Dispositif expérimental d'installation des sondes multi-paramètres permettant la mobilité de l'équipement dans la colonne d'eau.	18
Figure 5. Exemple d'application de la méthode développée à la segmentation d'un hydrogramme de crue automnale.	19
Figure 6. Résultats de l'analyse de covariance appliquée aux observations de concentration en phosphore total du bassin versant Intervention Walbridge, utilisant les observations au bassin Témoin en covariable, incluant les droites de régressions associées aux combinaisons PÉRIODE X SAISON (a), les valeurs F et les probabilités associées aux effets et interactions du modèle (b) de même que les moyennes ajustées au modèle et tests de différence significative ($p < 0,05$) (c).	22
Figure 7. Localisation des bassins Témoin et Intervention du ruisseau Fourchette à l'intérieur du bassin versant de la rivière Le Bras.	26
Figure 8. Cartographie des aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant du ruisseau Fourchette (Michaud et coll., 2004).....	27
Figure 9. Résultats de la segmentation des hydrogrammes en composantes de surface et souterraine aux exutoires des bassins versants Fourchette Témoin et Intervention.....	31
Figure 10. Flux hebdomadaires de matières en suspension et de phosphore total estimés pour les bassins versants Intervention et Témoin du ruisseau Fourchette en période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).....	35
Figure 11. Concentrations en matières en suspension observées aux bassins Fourchette Intervention et Témoin pour les périodes de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006), et pour la saison hivernale (décembre à avril) et de production (mai à novembre) (a); prédictions des concentrations en MES au bassin Intervention selon le modèle d'analyse de covariance utilisant les observations jumelées du bassin Témoin comme covariable (b).	38
Figure 12. Localisation des bassins Témoin et Intervention du ruisseau Walbridge à l'intérieur du bassin versant de la rivière aux Brochets.	40
Figure 13. Localisation des aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin Intervention du ruisseau Walbridge (source : Michaud et coll., 2004).....	43
Figure 14. Hydrogrammes segmentés respectifs des bassins Témoin et Intervention pour la période d'évaluation (2004-2006).....	47

Figure 15. Flux hebdomadaires de matières en suspension et de phosphore total estimés pour les bassins versants Intervention et Témoin du ruisseau Walbridge en période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).....	50
Figure 16. Flux journaliers de phosphore total, biodisponible et en solution à l'exutoire du bassin versant Intervention du ruisseau Walbridge en période d'évaluation (2004-2006).....	52
Figure 17. Localisation des bassins Témoin et Intervention du bassin versant de la rivière La Guerre.	59
Figure 18. Localisation des aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin Intervention de la rivière La Guerre (Michaud et coll., 2004).....	61
Figure 19. Flux hebdomadaires de matières en suspension et de phosphore total estimés pour les bassins versants Intervention et Témoin de la rivière La Guerre en période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).....	68
Figure 20. Courbes de régression représentatives de l'interaction entre la période et la covariable du dérivées du modèle ANCOVA appliqué flux hebdomadaires de MES (a) et de P total (b) du bassin Intervention La Guerre utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.	74
Figure 21. Courbes de régression représentatives de l'interaction entre la période, la saison et la covariable dérivées du modèle ANCOVA appliqué aux flux hebdomadaires de P biodisponible du bassin Intervention La Guerre utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.....	75

1 DESCRIPTION DU PROJET

Le présent rapport trace un bilan des connaissances acquises dans le cadre d'un réseau d'étude en bassins versants expérimentaux implanté par l'IRDA et ses partenaires en 2001 dans trois régions agricoles du Québec, soit en Chaudières-Appalaches (rivière Etchemin), en Montérégie-Est (rivière aux Brochets) et en Montérégie-Ouest (rivière La Guerre). Les trois projets d'actions concertées des gestionnaires d'entreprises agricoles, appuyés par les conseillers de clubs-conseils en agroenvironnement, de l'IRDA, du MAPAQ et du Centre d'expertises hydriques du Québec (CEHQ) partageaient le même objectif principal, soit celui de réduire les charges de sédiments et de nutriments de sources diffuses à l'exutoire du bassin, tout en assurant un égouttement optimal des terres et le maintien de la qualité des sols à long terme. La transition à des pratiques agricoles de conservation, l'aménagement du drainage de surface, l'implantation de structures de contrôle du ruissellement (rigoles d'interception, bassins de captage et avaloirs) de même que la mise en place de bandes riveraines et de haies brise-vent constituent les principales interventions agroenvironnementales réalisées dans le cadre du projet, dont les retombées environnementales ont été évaluées au moyen de suivis de qualité aux exutoires des trois paires de bassins jumeaux.

1.1 Objectifs

De façon plus spécifique, le réseau d'étude en bassins versants expérimentaux répondait aux objectifs suivants:

- Évaluer au plan technico-économique et environnemental l'efficacité d'interventions agroenvironnementales concertées en bassin versant, au moyen de suivis de la qualité de l'eau dans le cadre d'un dispositif expérimental en bassins jumeaux;
- Promouvoir les pratiques agricoles et les aménagements hydro-agricoles de conservation dans un cadre d'interventions concertées à l'échelle de petits bassins versants agricoles;
- Diffuser les outils et méthodologies développés dans le cadre du projet auprès des producteurs et conseillers agricoles du Québec en matière de diagnostic et d'amélioration de l'égouttement des terres;
- Diffuser les résultats de l'étude auprès du grand public et valoriser les implications du milieu agricole dans la préservation de la qualité de l'environnement rural;
- Promouvoir des approches volontaires et proactives dans la prévention de la pollution diffuse en milieu rural, en adéquation avec la spécificité des enjeux agroenvironnementaux et les capacités de faire du milieu agricole.

1.2 Méthodologie

Dans chacune des trois régions à l'étude, la réalisation du projet s'est appuyée sur des dispositifs expérimentaux de bassins jumeaux (bassins Témoin et Intervention) de façon à

documenter dans le temps l'évolution de la qualité de l'eau en réponse aux actions agroenvironnementales mises en œuvre. Ce type de dispositif expérimental permet de quantifier l'effet des interventions malgré les conditions hydrologiques variables pendant la période d'étude. Les observations colligées à l'exutoire du bassin Témoin servent alors de référence afin de détecter une différence significative dans la qualité de l'eau du bassin Intervention, entre la période de référence, précédant la mise en œuvre des actions agroenvironnementales, et la période d'évaluation, suivant leur déploiement. Le projet s'est ainsi déroulé selon trois étapes distinctes :

- Au cours de la période de référence (2001-2003), le suivi hydrométrique et de qualité de l'eau aux exutoires des trois paires de bassins a permis de décrire le fonctionnement hydrologique et les régimes d'exportation de sédiments et de nutriments des bassins Témoin et Intervention. Complétée au printemps 2003, cette première phase du projet a aussi permis d'établir des relations significatives entre les exportations diffuses de sédiments et de nutriments en provenance des deux bassins. Ces relations ont par la suite été mises à profit dans la détection et la quantification de différences dans les d'exportation des bassins suivant l'implantation des pratiques et aménagements agroenvironnementaux dans le bassin Intervention.
- La période d'aménagement des bassins Intervention, initiée au printemps 2003, s'est appuyée sur un diagnostic de haute précision de l'égouttement du parcellaire faisant appel à la télédétection, de même qu'à la modélisation du relief et des parcours du ruissellement de surface. Les trois bassins Intervention ont profité d'un aménagement systématique de leurs rives et d'aménagements ponctuels de structures de contrôle de ruissellement. Pour l'ensemble du réseau, les investissements dans l'aménagement hydro-agricole réalisés au cours de l'année 2003 consistaient notamment en l'implantation de 13 km de bande riveraine arbustive, la stabilisation par biogénie de sections de ruisseau sur 3 km, la plantation de 5,5 km de haies brise-vent et la réfection de sections de cours d'eau sur 2,6 km. L'implantation de tranchées filtrantes, de voies d'eau engazonnées, de structures de captage, de sorties de drains et d'empierrements a aussi été mis à profit dans la mise en valeur des ruisseaux des bassins Intervention. Les parcelles des bassins Intervention ont par ailleurs profité d'une transition à des pratiques culturales de conservation des sols. Cette transition s'est avérée particulièrement importante dans le bassin Intervention de la rivière La Guerre, où plus de la moitié du parcellaire ont été converti au semis direct et aux cultures de couverture.
- La poursuite du suivi hydrométrique et de la qualité de l'eau des bassins Intervention et Témoin au cours de la période d'évaluation (2004-2006) a permis de détecter et de quantifier l'effet des actions agroenvironnementales sur les exportations de sédiments et de nutriments à l'exutoire des bassins.

1.2.1 Sélection des bassins versants

La sélection des bassins versants expérimentaux du ruisseau Fourchette, tributaire de l'Etchemin, de la rivière aux Brochets, tributaire de la baie Missisquoi, et de la rivière La Guerre, tributaire du Lac Saint-François, s'est déroulée en deux étapes.

Les territoires ciblés ont d'abord fait l'objet d'une caractérisation de l'utilisation du territoire et de l'environnement biophysique au moyen des données à référence spatiale disponibles, principalement avec le support du système d'information géographique GIRMA (Gestion intégrée des ressources en milieu agricole) développé au MAPAQ. La présélection de bassins versants a d'abord ciblé l'identification de bassins présentant des similitudes au plan de :

- l'hydrologie et des superficies des bassins;
- l'utilisation du sol;
- la pédologie;
- le relief.

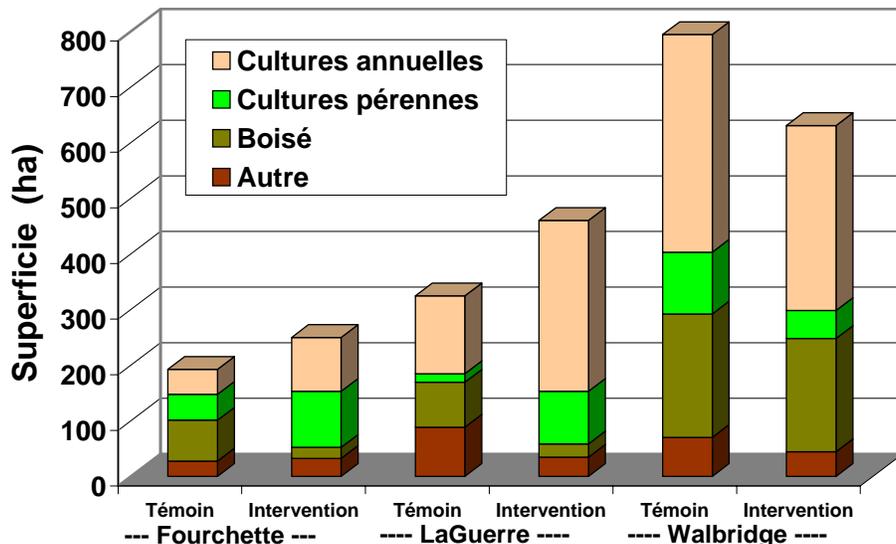


Figure 1. Superficie et utilisation du sol des bassins versants expérimentaux du réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles.

Les visites sur le terrain ont permis par la suite d'évaluer la faisabilité du suivi hydrométrique dans les bassins présélectionnés, de loin le facteur limitant au plan du choix des bassins. La sélection des stations de mesures hydrométriques a profité d'une validation de la part de l'équipe du Centre d'expertises hydriques du Québec (CEHQ, MDDEP) alors que les conseillers des clubs agro-environnementaux ont participé à la sélection finale des bassins Témoins et Intervention. Dans l'ensemble, la superficie des bassins expérimentaux retenus se situe entre 3 et 8 km². Cette échelle d'étude a permis de concilier la faisabilité d'un suivi de qualité de l'eau en continu (cours d'eau permanent)

tout en conservant une échelle d'intervention réaliste (5 à 15 fermes) compte tenu de la courte période allouée à la mise en œuvre des actions concertées. La figure 1 présente l'utilisation du sol des trois paires de bassins jumeaux sélectionnés. Les cultures annuelles dominent l'occupation des sols dans les bassins de la Montérégie, alors que les cultures pérennes et le couvert forestier couvrent une proportion relativement plus importante des bassins beaucerons. Les localisations des dispositifs expérimentaux sont illustrées dans les sections suivantes du présent rapport. L'annexe 1 rapporte pour sa part l'utilisation des sols et les principales caractéristiques biophysiques des trois paires de bassins jumeaux.

1.2.2 Diagnostic et aménagement hydro-agricole

La planification et la mise en œuvre de pratiques et aménagements de conservation des sols et de l'eau dans les bassins Intervention se sont appuyées sur la caractérisation biophysique des bassins et un diagnostic détaillé de l'égouttement du parcellaire faisant appel à la télédétection aéroportée. L'ensemble des six bassins expérimentaux a d'abord profité d'une représentation et d'une intégration spatiale de leurs propriétés topographiques, pédologiques et hydrographiques, de même que d'un découpage du parcellaire à l'aide de photographies aériennes ortho-rectifiées. Les trois bassins Intervention ont par ailleurs bénéficié de captures aériennes d'images multispectrales. Réalisées à la mi-mai 2002, ces images aériennes d'une résolution d'un mètre au sol se sont avérées particulièrement révélatrices de l'égouttement du parcellaire (figure 2) et d'un support efficace dans la planification des actions agroenvironnementales. Tôt au printemps 2002, les trois bassins Intervention ont aussi profité d'un diagnostic de terrain photographique et géopositionné de l'ensemble des rives de cours d'eau et des confluences de fossés. Les campagnes d'observation ont permis de répertorier et localiser les marques d'érosion des talus (rigoles, effondrements des berges), l'état général du cours d'eau (largeur des bandes riveraines, hauteurs des talus, présence de haies) et les manifestations du ruissellement et de stagnation de l'eau dans les champs.

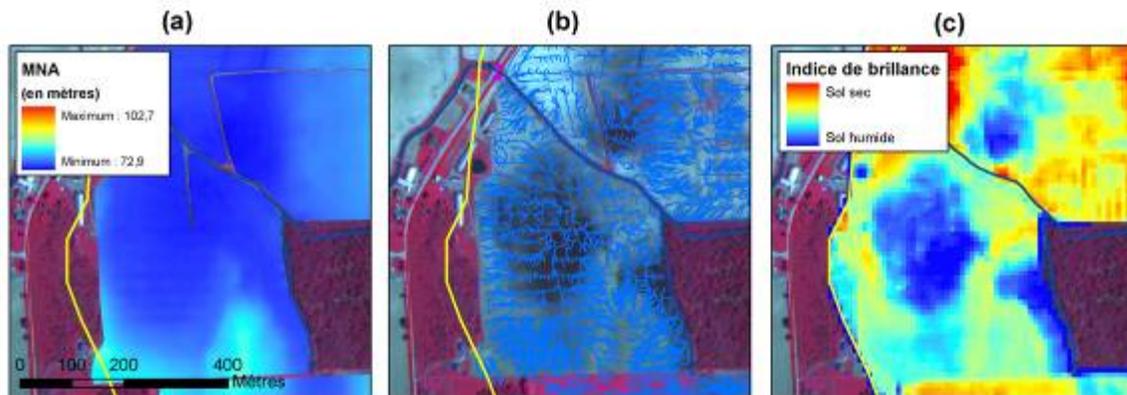


Figure 2. Modèle numérique d'élévation (a), patron spatial du parcours des eaux de ruissellement (b) et indice de brillance du sol dérivé de l'image multi-spectrale (c) d'un secteur du bassin versant Intervention du ruisseau Walbridge. La position basse du relief et la concentration du parcours de l'eau explique ici la présence d'une zone mal égouttée du parcellaire.

La caractérisation haute précision du relief au moyen de capteurs GPS a complété le diagnostic d'égouttement du parcellaire des trois bassins Intervention. La saisie et le traitement des données d'élévation des bassins Intervention de la Montérégie (Walbridge et La Guerre) ont été coordonnés par M. Roger Rivest, conseiller en grandes cultures à la Direction régionale Montérégie-Est du MAPAQ, alors que les données d'élévation GPS du bassin Fourchette ont été saisies et traitées par l'équipe de IRDA. Ces cartographies du relief ont permis de cerner avec précision le parcours du ruissellement dans les champs, de localiser les dépressions et d'estimer les volumes de terre nécessaires à leur comblement. La modélisation du relief a aussi permis d'identifier les points d'entrée du ruissellement dans les fossés et cours d'eau et d'en évaluer les superficies contributives, des informations fort utiles dans la planification des aménagements hydro-agricoles ponctuels, tels que des structures de captage ou des tranchées filtrantes. La topographie, les parcours de l'eau et l'indice de brillance des sols dérivés des images multispectrales sont présentés en annexe II et III pour les trois bassins Intervention du réseau.

L'ensemble des informations à référence spatiale pour les trois bassins Intervention a été intégrée et mise en forme dans des atlas électroniques conviviaux créés avec le logiciel de géomatique TNT-Atlas. Ce format a permis l'accessibilité sans frais aux données à référence spatiale générées dans le cadre du projet auprès de l'ensemble des conseillers et producteurs agricoles du réseau d'étude. L'intégration des données au sein d'un même système d'information géographique a permis d'appréhender le parcellaire dans sa globalité. Une forte corrélation a été mise en relief entre le relevé des marques d'érosion, les images aériennes, le modèle numérique de terrain et la modélisation des parcours d'écoulement (Duguet et al., 2002). Le diagnostic détaillé des bassins a permis de déterminer les zones critiques, particulièrement sensibles à la production de ruissellement de surface et l'exportation de sédiments et nutriments vers le réseau hydrographique. L'identification de ces zones hydro-actives sensibles, généralement situées en position basse du relief ou ceinturant le réseau hydrographique, a facilité la planification, sur mesure, des pratiques et aménagements hydro-agricoles qui concilient l'égouttement des sols et la préservation de la qualité de l'eau.

1.2.3 Bilans agronomiques

La caractérisation des systèmes de production agricole dans les bassins versants est essentielle à l'interprétation des données du suivi de qualité de l'eau aux exutoires. Les données pertinentes à la régie des sols, des cultures et de l'eau ont ainsi été colligées à l'échelle de la parcelle pour les six bassins expérimentaux, en période de référence comme en période d'évaluation, de façon à supporter l'interprétation à donner aux différences observées dans la qualité de l'eau entre ces périodes. Les suivis agronomiques à l'échelle de la parcelle des exploitations agricoles des bassins versants Walbridge, Fourchette et La Guerre ont été respectivement coordonnés par les conseillers des Clubs-conseils en agroenvironnement Dura-Club, Club de fertilisation de la Beauce et Club du bassin La Guerre. Les entrevues individuelles auprès des gestionnaires d'entreprises agricoles, localisés en tout ou en partie dans les bassins à l'étude, ont notamment permis de colliger des informations pertinentes à :

- l'identification du parcellaire et la représentation du plan de ferme;
- le plan de culture;
- les particularités du drainage de surface et souterrain;
- les pratiques culturales, incluant les dates et le type d'outil aratoire utilisé;
- les pratiques de gestion des épandages des engrais de ferme, incluant les propriétés de l'engrais de ferme, les périodes et le mode d'épandage;
- les pratiques de fertilisation minérale, incluant les formules, les dates et le mode d'apport des engrais minéraux.

Les bilans d'apport en phosphore à la surface du sol et les bilans agronomiques de l'azote ont été estimés à l'échelle de la parcelle puis agrégés à l'échelle des bassins versants pour l'ensemble des bassins versants expérimentaux. Une description de la banque de données agronomiques colligées à l'échelle de la parcelle est présentée en annexe IV.

1.2.4 Monitoring aux exutoires des bassins

La période de suivi hydrométrique et de la qualité de l'eau des six bassins versants expérimentaux dans le cadre de la présente étude s'est étendue de novembre 2001 à octobre 2006. Concrètement, le suivi hydrométrique et de la qualité de l'eau des ruisseaux a été supporté aux moyens de trois dispositifs complémentaires, incluant 1) un suivi en continu (15 min) du débit des ruisseaux au moyen de limnimètres; 2) un enregistrement en continu de la conductivité, de la température et de la turbidité de la colonne d'eau au moyen de sondes mobiles multiparamètres (limité à la période d'évaluation pour les ruisseaux Fourchette et Walbridge) et 3) des échantillonnages ponctuels des ruisseaux à raison de trois campagnes par évènement de crue, suivis de la détermination en laboratoire des concentrations des échantillons en MES, en phosphore (total, dissous, orthophosphate et biodisponible), en azote (nitrate et ammoniacale) et autres éléments (Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Mn, Cu et B).

1.2.4.1 Relevés météorologiques et hydrométriques

L'interprétation des bilans hydriques de l'ensemble du réseau a été supportée par l'acquisition de données météorologiques. Les données journalières de précipitations, température et couverture de neige pour la période d'étude aux bassins Fourchette, Walbridge et La Guerre ont été obtenues de la banque de données d'Environnement Canada (2003, 2006) pour les stations localisées respectivement à Scott, Farnham et Saint-Anicet.

Le suivi hydrométrique des ruisseaux Fourchette et Walbridge a été supervisé par l'équipe du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), alors que celui de la rivière La Guerre a été assuré par l'équipe de l'IRDA. Les hauteurs de la colonne d'eau des six bassins versants expérimentaux ont été enregistrées en continu aux stations de mesure localisées près des exutoires des bassins à l'aide de bulleurs (modèles Hydrologic 2003), alors que le tarage hauteur-débit des stations de mesure a été rendu possible par des mesures ponctuelles quatre fois l'an à l'aide d'un moulinet hydrologique. Deux mesures ont été réalisées sous couvert de glace et deux en période de présence de végétation

aquatique afin de générer une correction adéquate de la relation hauteur-débit observée lors de ces périodes.

Le suivi hydrométrique du bassin versant Intervention de la rivière La Guerre a requis un protocole adapté aux refoulements ponctuels occasionnés par la gestion artificielle du débit de cette rivière, pompée à son embouchure dans le Lac Saint-François. Le refoulement dans les tributaires, occasionné par l'arrêt du pompage en période de pointe récréotouristique au Lac Saint-François, de même que par les crues naturelles de la rivière La Guerre, limite en effet la possibilité d'établir une relation linéaire stable entre le niveau de l'eau et le débit du ruisseau à l'exutoire du bassin Intervention. L'équipe de l'IRDA a ainsi multiplié les mesures de débits aux exutoires des deux bassins expérimentaux pendant les périodes d'importante activité hydrologique, permettant d'ajuster l'estimation du débit du bassin Intervention avec les observations au bassin Témoin. La position relativement plus élevée occupée par le bassin Témoin a en effet soustrait ce dernier à la grande majorité des épisodes récurrents de refoulement observés au bassin Intervention.



Figure 3. Dispositif de suivi hydrométrique et de qualité de l'eau incluant le limnimètre et le jaugeage du débit (a), la sonde multi-paramètres à mobilité verticale (b) et l'échantillonnage ponctuel (c).

1.2.4.2 Échantillonnages ponctuels et dosages analytiques

L'occupation du sol relativement intensive et la faible étendue des bassins versants conditionnent des réponses hydrologiques courtes et intenses aux événements de précipitations et de fonte de neige. Les teneurs des eaux de surface en matières en suspension et en différentes fractions de phosphore sont particulièrement influencées par ces réponses hydrologiques intenses. La concentration en P total observée au ruisseau Walbridge Intervention en Montérégie varie par exemple entre 10 et 4 000 mg/l, alors que le débit passe de l'étiage à la crue estivale (observations rapportées en annexe V). De façon à bien prendre en compte la contribution des crues au bilan des exportations de

sédiments et de nutriments, le protocole d'échantillonnage a favorisé la collecte d'échantillons lors des crues du ruisseau, sur la base d'un minimum de trois prélèvements par crue, généralement prélevés de part et d'autre de la pointe de crue. Typiquement, une paire d'échantillons était prélevée dans la montée de l'hydrogramme et deux paires additionnelles au cours des 24 à 48 heures suivantes, durant la décrue. Des échantillonnages en régime d'écoulement de base ont aussi permis de caractériser la qualité de l'eau au fil des saisons.

Au cours des périodes de référence et d'évaluation (2001-2006), le nombre total d'échantillons d'eau été prélevés aux exutoires des bassins versants expérimentaux de la rivière La Guerre, du ruisseau Fourchette et du ruisseau Walbridge varie entre 252 et 292 échantillons. Ces échantillons d'eau de surface ont profité de dosages analytiques en laboratoire. En parallèle, près de 300 échantillons additionnels ont été prélevés aux exutoires des bassins de la rivière La Guerre à l'aide de deux échantillonneurs automatiques (pas d'échantillonnage de 27 heures). Ces échantillons ont fait l'objet de déterminations de turbidité et de conductivité électrique afin de documenter l'activité hydrologique du bassin versant. Suivant leur prélèvement, les échantillons d'eau ont été conservés à 4°C jusqu'à leur acheminement au laboratoire de physico-chimie de l'IRDA, puis dosés pour les matières en suspension (MES), les diverses formes de N (NO₃⁻ et NH₄⁺), la spéciation du P en ses composantes réactives soluble, dissoute, particulaire, biodisponible et totale, et enfin les principaux ions en solution (Ca, Mg, Na, K, Fe, Cu, Al, Mn, et B). Les particules en suspension (MES) ont été déterminées par filtration à 0,45 µm (Greenberg et coll., 1992a). Le phosphore réactif dissous (P_{dissous}) a été mesuré sur les échantillons filtrés (< 0.45 µm) en utilisant la méthode de Murphy et Riley (1962). Le phosphore biodisponible (P_{bio}) a été déterminé suite à une extraction avec NaOH 0,1 N selon la méthode de Sharpley et coll. (1991), tandis que la concentration de phosphore total (P_{total}) a été mesurée sur un échantillon digéré par la méthode des persulfates (Greenberg et coll., 1992b). Les différentes formes d'azote : ammonium (NH₄⁺), nitrates (NO₃⁻) ont été mesurées selon le protocole de Greenberg et coll. (1992c). Le dosage du calcium et autres éléments en solution a été réalisé selon le protocole de Greenberg et coll. (1992d). Les résultats des déterminations analytiques de tous les paramètres à l'étude sont reproduits en annexe V.

1.2.4.3 Sondes multi-paramètres

Le suivi de la signature géochimique de l'eau selon un pas de temps de 15 minutes aux exutoires des quatre bassins des ruisseaux Fourchette et Walbridge durant la période d'évaluation a été réalisé au moyen de sondes multi-paramètres (YSI, modèle 6600) permettant l'enregistrement des mesures de conductivité électrique, de température, de hauteur d'eau et de turbidité. Le dispositif expérimental développé spécifiquement pour les besoins du projet permet la mobilité de la sonde dans la colonne d'eau en réponse aux fluctuations rapides des débits (figure 4). Les capteurs conservent ainsi en tout temps une position optimale dans la colonne d'eau afin d'enregistrer le signal géochimique. Les résultats des dosages en laboratoire des échantillons prélevés ponctuellement dans les ruisseaux ont été mis à contribution dans le calibrage des sondes, permettant un ajustement optimal ($R^2 > 0,95$, $p < 0,001$) des relations établies entre les mesures de

turbidité et de conductivité enregistrées par les sondes et les déterminations en laboratoire.

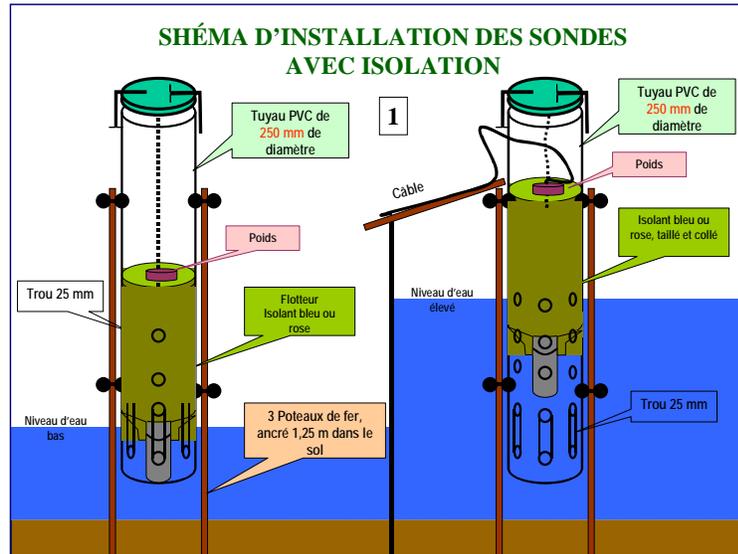


Figure 4. Dispositif expérimental d'installation des sondes multi-paramètres permettant la mobilité de l'équipement dans la colonne d'eau.

Les hydrogrammes des crues observés au cours de la période d'évaluation ont systématiquement été séparés en leurs composantes d'écoulement de base (subsurface) et de ruissellement de surface. La méthode de séparation développée pour les fins du projet est basée sur l'application du principe du bilan de masse aux observations de conductivité électrique de l'eau révélées par les lectures de la sonde multi-paramètre. L'équation 1 décrit la méthode de calcul permettant d'estimer la contribution de l'écoulement subsurface (combinant les contributions des drains et de la résurgence de la nappe) au débit global du ruisseau) :

$$QB_i = \frac{Q_i (C_i - C_{min})}{CB_i - C_{min}} \quad (1)$$

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 » (uS/cm);

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

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

La figure 5 illustre un exemple d'application de la méthode à la segmentation d'un hydrogramme de crue automnale du ruisseau. Conceptuellement, la méthode utilise la conductivité électrique de l'eau comme indicateur naturel de l'origine des écoulements à l'échelle du bassin versant. Compte tenu des chaulages récurrents de la couche arable des sols en cultures et de la nature calcaire des roches-mères de plusieurs bassins expérimentaux, les écoulements souterrains se distinguent nettement de l'écoulement de surface au plan de leur composition en électrolytes. Pour chacun des événements hydrologiques comportant une composante significative de ruissellement de surface, une relation linéaire est ainsi établie entre la conductivité électrique et les contributions relatives du ruissellement et de l'écoulement souterrain. Cette approche requière une conductivité de référence associée au ruissellement de surface pour la période d'étude (C_{min}), déterminée par la valeur de conductivité électrique la plus basse observée au cours de la période d'étude. D'autre part, il a été assumé que la conductivité de l'écoulement de base, associée à l'écoulement subsurface, décroissait à taux constant entre le début de l'évènement de crue et le retour de l'hydrogramme à son débit de base.

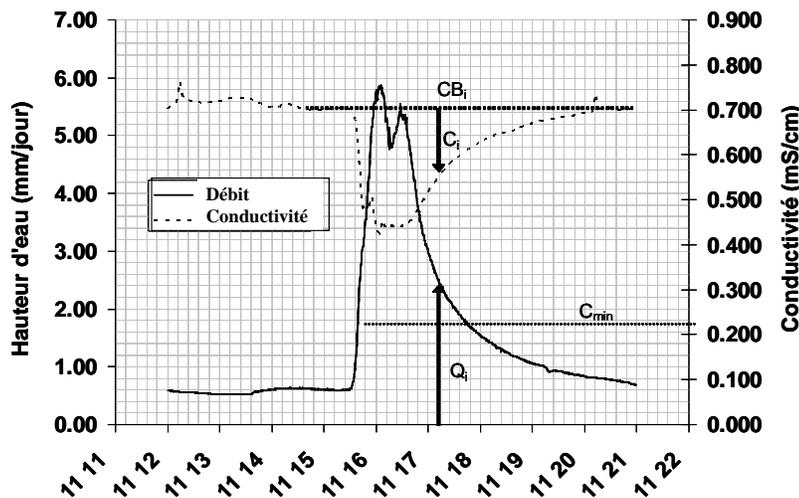


Figure 5. Exemple d'application de la méthode développée à la segmentation d'un hydrogramme de crue automnale.

1.2.5 Traitements statistiques

1.2.5.1 Estimations des flux de sédiments et nutriments

Les modélisations des flux journaliers de sédiments (MES), de phosphore (P), d'azote (N) et d'éléments majeurs ont été supportées par le logiciel Flux 5.0 (Walker, 1998) sur la base de régressions exprimant la relation entre les concentrations ponctuelles des paramètres de qualité de l'eau et le débit du ruisseau. La procédure *Jackknife*, reconnue pour produire des estimateurs sans biais pour différentes pentes de C/Q (Concentration/Débit) (Walker, 1987), a été utilisée pour estimer la variance de l'erreur dans la détermination des flux exportés à l'exutoire des bassins versants expérimentaux. Les coefficients de variation (CV) des estimations de flux pour l'ensemble des

paramètres de qualité de l'eau à l'étude demeurent généralement inférieurs à 0,20. L'examen des résidus (log-observation/estimation) pour les données de flux et de concentrations a démontré que ces derniers étaient indépendants du débit et de la saison. Moins de 1 % des observations de qualité de l'eau ont été identifiées comme aberrantes à un seuil de 5 % et ont été exclues du traitement statistique.

Les modélisations des concentrations en fonction du débit (C/Q) des différents paramètres de qualité de l'eau ont été développées suivant la stratification des observations en classes de débits et selon la période de l'année. Les débits les plus élevés correspondent à une forte activité hydrologique dans les bassins versants expérimentaux, alors que les processus de ruissellement de surface sont à l'œuvre sur des portions significatives du parcellaire en culture. Les pentes de la relation C/Q pour les paramètres de MES et les différentes fractions de P sont alors particulièrement élevées. En régime d'écoulement de base, les relations C/Q apparaissent plus aléatoires, voire négatives, en raison de phénomènes de rétention biotique et abiotique dans le réseau hydrographique et de dilution des sources ponctuelles de contamination.

La stratification des observations de qualité de l'eau selon les périodes hivernale (décembre à avril) et de production (mai à novembre) traduit pour sa part l'influence des conditions climatiques et du calendrier des opérations culturales sur la qualité du ruissellement. En période de recharge hivernale, les effets de gel contribuent à l'agrégation du sol et réduisent la capacité d'arrachement et de transport du ruissellement. L'eau de fonte du couvert de neige peut aussi contribuer à la dilution des concentrations en MES ou en P. En saison de production, les travaux aratoires ou l'apport récent d'engrais de ferme et d'engrais minéraux contribuent à l'enrichissement du ruissellement de surface ou souterrain. Pour les fins de l'étude, une stratification identique des observations selon le débit ou la période a été appliquée à chacune des paires de bassins jumeaux, tant pour les périodes de référence que d'évaluation, afin de permettre une comparaison de leurs régimes d'exportation.

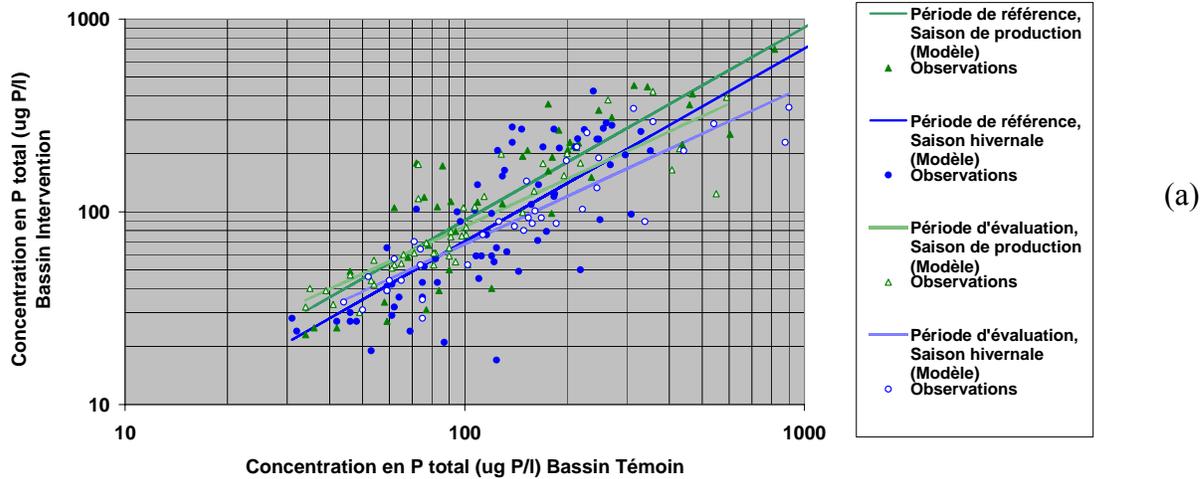
1.2.5.2 Détection de réponses de la qualité de l'eau aux actions concertées

La détection de réponses de la qualité de l'eau aux actions concertées mises en œuvre dans les bassins Intervention au printemps 2003 a été supportée par une approche d'analyse de covariance des paramètres de qualité utilisant les observations du bassin Témoin en covariable. Conceptuellement, cette méthode consiste à comparer la relation établie entre les observations de qualité de l'eau pour les bassins Intervention et Témoin au cours de la période de référence, à la relation établie entre les mêmes paramètres au cours de la période d'évaluation. Les observations colligées aux bassins Témoin servent alors de balise dans la détection d'un changement significatif dans le bassin Intervention, nonobstant la variabilité interannuelle dans les conditions hydrologiques.

Pour les trois paires de bassins versants à l'étude, les effets de la covariable (observation du bassin Témoin), de la période (référence vs évaluation) et de la saison (hiver vs production), de même que leurs interactions ont été considérées dans les modèles ANCOVA appliqués aux observations de concentrations de MES, P et Ca du bassin

Intervention. Une transformation logarithmique a été appliquée à l'ensemble des observations de qualité de l'eau et de débits préalablement aux analyses statistiques de covariance, de façon à normaliser leurs distributions. L'analyse ANCOVA réalisée comporte plusieurs étapes. Dans un premier temps, l'effet de la covariable (observations au bassin Témoin) a d'abord été analysée, de façon à valider que celle-ci contribue à expliquer la variabilité des observations au bassin Témoin (pente de la régression non nulle). En second lieu, les interactions de la covariable avec la période (référence vs évaluation) et la saison (hiver vs production) ont été analysées. Une interaction significative signifie alors que la pente de régression varie selon la période et/ou la saison. L'interaction significative est alors maintenue dans le modèle ANCOVA. Il s'agit alors d'un modèle ANCOVA complet qui comporte des pentes de régression différentes pour la saison et/ou la période. Les différences significatives entre les périodes et les saisons doivent alors être évaluées de façon distincte pour différentes valeurs de la covariable. En cas d'interaction non significative avec la covariable, le modèle attribue la même pente pour les saisons ou les périodes. Il s'agit alors d'un modèle ANCOVA réduit, dont les effets simples de la période et/ou de la saison sont traduits par les ordonnées à l'origine du modèle de régression.

La figure 6 illustre la démarche d'analyse de covariance appliquée aux observations de concentration en phosphore total des bassins Walbridge. L'analyse de covariance confirme d'abord une forte relation linéaire significative entre les observations des bassins Témoin et Intervention ($p < 0,001$). L'analyse détecte en second lieu une interaction significative entre la période et la covariable ($p < 0,05$). Il en résulte des pentes différentes pour les périodes de référence et d'évaluation dans le modèle ANCOVA final. Puisque l'interaction de la saison avec la covariable n'est pas significative, le modèle retient des pentes de régression similaires pour les saisons. L'effet simple de la saison ($p < 0,001$) est cependant pris en compte par des ordonnées à l'origine distinctes dans le modèle de régression. Dans ce cas précis, les différences entre les concentrations en P total associées aux périodes de référence et d'évaluation (effet période) ne sont significatives qu'à partir du percentile 75 % de la covariable en période de référence. Conceptuellement, ces résultats indiquent qu'une réponse significative est détectée dans la concentration en P total du bassin Intervention, mais seulement pour les crues les plus intenses du ruisseau. Pour une concentration de référence de 355 mg/l de P total au bassin Témoin par exemple, la teneur en P de la lame d'eau au bassin Intervention était de 283 mg/l en période de référence et passe à 213 mg/l en période d'évaluation ($p < 0,05$), soit une réduction de 25 %. Cette différence significative dans les concentrations demeure indépendante de la saison et peut ainsi être attribuée tant en saison hivernale qu'en saison de production.



Effet	Valeur F	Pr > F
Periode	3,47	0,0638
Saison	11,21	0,001
Période X Saison	0,09	0,7701
Covariable	457,95	<,0001
Covariable X Période	4,53	0,0345

Distribution de la covariable	Concentration Ptotal (ug P/l)		Différence	Probabilité T	
	Bassin Témoin	Bassin Intervention			
	Période de Référence	Période de Référence	Période d'évaluation		
Percentile-10%	51	41	44	-7%	NS
Percentile-25%	72	58	58	-1%	NS
Percentile-50%	120	96	88	8%	NS
Percentile-75%	214	170	141	17%	0,0182
Percentile-90%	355	283	213	25%	0,0105

Figure 6. Résultats de l'analyse de covariance appliquée aux observations de concentration en phosphore total du bassin versant Intervention Walbridge, utilisant les observations au bassin Témoin en covariable, incluant les droites de régressions associées aux combinaisons PÉRIODE X SAISON (a), les valeurs F et les probabilités associées aux effets et interactions du modèle (b) de même que les moyennes ajustées au modèle et tests de différence significative ($p < 0,05$) (c).

2 RÉSULTATS ET ANALYSE

Afin d'en faciliter l'interprétation par le lecteur, les résultats de l'étude pertinents aux trois régions à l'étude sont présentés successivement au fil des sections suivantes. Bien que ces régions soient représentatives de paysages, de régions agroclimatiques et de vocations agricoles contrastés, rappelons cependant quelques traits communs à l'ensemble des projets.

Dynamique communautaire et adhésion au projet : La réalisation simultanée des projets dans les trois régions à l'étude s'est ancrée dans une dynamique communautaire similaire favorisant les rencontres et interactions entre les producteurs, les conseillers agricoles et les partenaires scientifiques au fil de la réalisation du projet. L'objectif principal du réseau, soit l'amélioration de la qualité des eaux de surface par une action agroenvironnementale concertée à l'échelle du bassin versant, a reçu dès le départ un aval favorable de la part des producteurs des trois régions. La plupart d'entre eux étaient déjà membres d'un Club-conseil en agroenvironnement et avaient investi dans la fertilisation intégrée des cultures. Des pratiques culturales de conservation des sols, notamment le semis direct, était aussi en phase d'introduction ou bien intégrées dans les systèmes de production de quelques entreprises dans les trois bassins Intervention du réseau. La correction de problèmes d'égouttement par l'aménagement hydro-agricole du parcellaire soulevait par ailleurs un intérêt certain pour la plupart des entreprises et s'est affirmé dès le départ comme une priorité d'action dans les trois régions à l'étude. Pour les conseillers agricoles, le diagnostic et l'aménagement hydro-agricole du parcellaire s'inscrivait dès lors en complémentarité de leur accompagnement au plan de la fertilisation raisonnée des cultures et de la transition aux pratiques culturales durables.

Priorité à l'aménagement hydro-agricole : Les diagnostics d'égouttement supportés par la télédétection et la modélisation de haute précision du relief réalisés en début de projet (période de référence) ont confirmé la présence de problèmes d'égouttement du parcellaire pour la majorité des entreprises agricoles cultivant des terres dans les bassins Intervention. Ce constat s'est traduit par un aménagement hydro-agricole touchant pratiquement la totalité des rives de cours d'eau des bassins Intervention. Aussi, la participation des entreprises dans l'aménagement a été, à toutes fins pratiques, unanime, impliquant des investissements en nature ou en argent de la part des propriétaires à la hauteur de 30 % des coûts totaux associées à la réalisation des différents projets d'aménagement.

Deux considérations ont particulièrement favorisé l'adhésion concertée des propriétaires au projet communautaire d'aménagement de leurs ruisseaux. La première est la conciliation des objectifs de productivité des cultures et de prévention de la contamination des eaux de surface. D'un avis généralement partagé par les producteurs participant au réseau d'étude, l'égouttement déficient et la dégradation de la condition physique du profil cultural constitue le principal facteur limitant dans le rendement des cultures. En parallèle, les zones de champ mal égouttées constituent aussi les principales zones d'émission de ruissellement de surface, qui entraîne sédiments et nutriments vers le

cours d'eau. Le processus d'envasement des fossés et des cours d'eau perpétue le cercle vicieux de drains souterrains inefficaces, d'un égouttement déficient du parcellaire, de baisses de rendement et de contamination diffuse des eaux de surface. La préservation du réseau hydro-agricole est donc un investissement gagnant-gagnant, porteur de bénéfices à la ferme et hors-ferme.

La deuxième considération qui milite pour une action concertée est que la durabilité de l'investissement public et privé dans l'aménagement hydro-agricole passe nécessairement par l'implication de l'ensemble des riverains d'un même tronçon de cours d'eau. La dégradation d'une section de cours d'eau, consécutive à la non adhésion d'un ou plusieurs riverains au projet, aura des implications sur l'égouttement en amont, ou sur la sédimentation en aval. Dans les deux cas, le bénéfice escompté dans l'aménagement hydro-agricole est alors compromis. La participation de l'ensemble des riverains dans la préservation du cours d'eau demeure ainsi un gage de rentabilité sur l'investissement.

Dans le cadre du présent projet, la stratégie raisonnée de gestion du ruissellement de surface mise de l'avant s'est appuyée sur les principes suivants :

- à commencer par une pratique culturale au champ qui favorise la rugosité de surface, la qualité du profil cultural et l'infiltration de l'eau dans le sol;
- un rabattement rapide de la nappe phréatique par un drainage souterrain efficace;
- un drainage de surface qui favorise le morcellement de la lame de ruissellement;
- une évacuation en douceur des pointes de crue printanière par des structures de captage aménagées aux endroits stratégiques;
- l'aménagement de zones tampons riveraines, qui assurent la stabilité des talus des cours d'eau, interceptent les sédiments et brisent la connectivité hydrologique entre le champ et le ruisseau;
- un aménagement du cours d'eau qui prévient l'érosion des talus et assure une évacuation efficace des eaux de drainage souterrain.

Les atlas agroenvironnementaux, intégrant l'ensemble des données diagnostiques recueillies sur les bassins versants Intervention, ont supporté la planification des chantiers d'aménagements hydro-agricoles mis en œuvre au printemps 2003. De format convivial et distribués à l'ensemble des propriétaires et conseillers agricoles impliqués dans le projet, les atlas se sont avérés un outil rassembleur et utile pour cibler les zones sensibles au ruissellement et à l'érosion, identifier la nature et la localisation des interventions et enfin coordonner la mise en œuvre des chantiers auprès des nombreux intervenants impliqués dans la réalisation des travaux. Au fil des rencontres de groupe et individuelles auprès des propriétaires des exploitations agricoles, les principales problématiques de gestion de l'eau ciblées concernaient l'aménagement riverain et l'égouttement des terres, notamment :

- l'absence de bande riveraine;
- des talus instables (décrochement);
- le ravinement dans les talus vis à vis les rigoles et les sorties de drain;
- le drainage de surface déficient et le transport de sédiments.

Les interventions hydro-agricoles réalisées en 2003 ont ciblé particulièrement l'aménagement systématique de bandes riveraines arbustives ou de haies brise-vent en bordure des cours d'eau, la stabilisation des rives de cours d'eau, l'aménagement des confluences de fossés et le contrôle des zones de concentration du ruissellement de surface. Les aménagements réalisés dans les trois bassins Intervention du réseau au cours du projet sont illustrés en annexe VII. Les sections suivantes décrivent les problématiques ciblées et les interventions priorisées dans les bassins Fourchette, Walbridge et La Guerre.

2.1 Ruisseau Fourchette

Le ruisseau Fourchette est le principal tributaire de la rivière Le Bras, qui se jette dans la rivière Etchemin à la hauteur de Saint-Henri-de-Lévis (figure 7). Le bassin versant du ruisseau Fourchette couvre une superficie de 120 km², dont plus de 60 % est à vocation agricole. Environ 75 % des cours d'eau sont bordés par des terres agricoles sur les deux rives et 4 % sur une seule rive. La pression environnementale des activités agricoles y est particulièrement forte, alors que la densité animale est de l'ordre de 2,1 unités animales/hectare, provenant principalement d'élevages porcins, laitiers, avicoles et de bovins de boucherie. Ces caractéristiques, jumelées à de pratiques culturales intensives et à un réseau hydrographique en mauvais état (érosion parfois sévère), ont un impact direct sur l'eau de la rivière Etchemin. La qualité de l'eau de la rivière Etchemin est en effet jugée très bonne en amont de l'embouchure de la rivière Le Bras. Plus de 75 % de la charge de nutriments de la rivière Etchemin proviendrait en effet de la rivière Le Bras, dont 53 % est associé au ruisseau Fourchette. Il va de soi que cette problématique compromet, entre autres usages de l'eau, le potentiel récréotouristique du bassin versant de l'Etchemin. La charge de phosphore à l'embouchure de l'Etchemin est la deuxième plus élevée parmi les rivières du Québec, atteignant un niveau de 0,9 kg/ha/an.

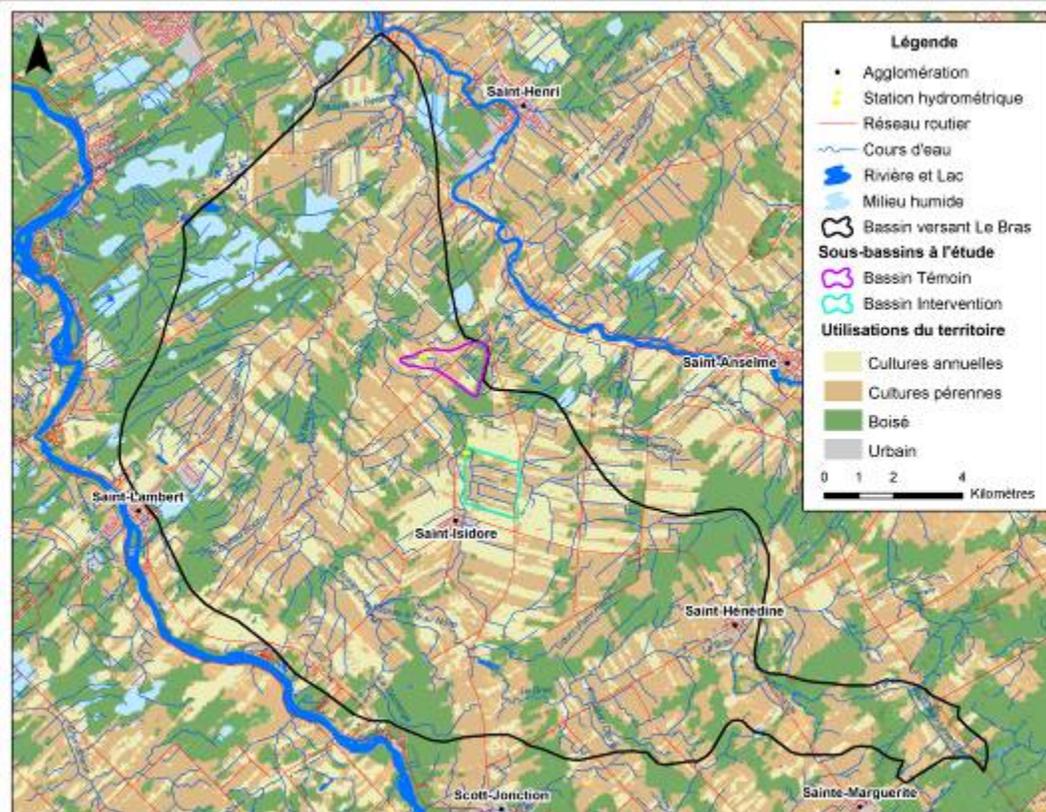


Figure 7. Localisation des bassins Témoin et Intervention du ruisseau Fourchette à l'intérieur du bassin versant de la rivière Le Bras.

2.1.1 Diagnostic et aménagement hydro-agricole

Le diagnostic du bassin Intervention du ruisseau Fourchette a mis en relief un mauvais état des talus sur plus de 2,5 km de longueur de cours d'eau verbalisés, ainsi que la présence de ravinement à de nombreuses embouchures de rigoles et de sorties de drains souterrains. Les talus aménagés avec une inclinaison de 1 :1 m dans le passé présentaient fréquemment des décrochements ou glissements de la partie inférieure du talus vers le fond du cours d'eau. Des cours d'eau profonds et des labours près des talus, de même qu'une pente trop inclinée des talus pour ce type de sol favorisaient les décrochements de talus et la sédimentation dans le lit des cours d'eau.

La figure 8 et le tableau 1 décrivent les aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant Intervention du ruisseau Fourchette. Les travaux d'aménagements ciblés pour la protection des rives de cours d'eau incluent l'adoucissement de certains talus instables selon une pente de 1,5 :1 m, l'ensemencement d'herbacées en rive, la stabilisation de sections de talus dégradés au moyen de techniques de génie végétal et l'établissement d'une bande riveraine (1 rangée d'arbustes ou d'arbres) sur l'ensemble des rives des cours d'eau municipaux. Les espèces arborescentes ont été privilégiées pour établir une haie brise-vent.

L'érosion par ravinement en de nombreux points du réseau hydrographique résultait par ailleurs d'un drainage de surface déficient, où un trop grand volume d'eau de ruissellement était évacué sans protection vers la rive du ruisseau. Les planches arrondies et étroites, combinées à des rigoles peu profondes, accentuaient la problématique de concentration du ruissellement. Pour acheminer en douceur le ruissellement de surface vers le cours d'eau, des voies d'eau engazonnées et des perrés ont été aménagés à l'embouchure des rigoles ou des dépressions. Quelques bassins de captage munis d'avaloirs ont enfin été aménagés aux sorties de rigoles présentant un potentiel élevé de transport de sédiments, afin d'en réduire l'exportation vers le ruisseau.

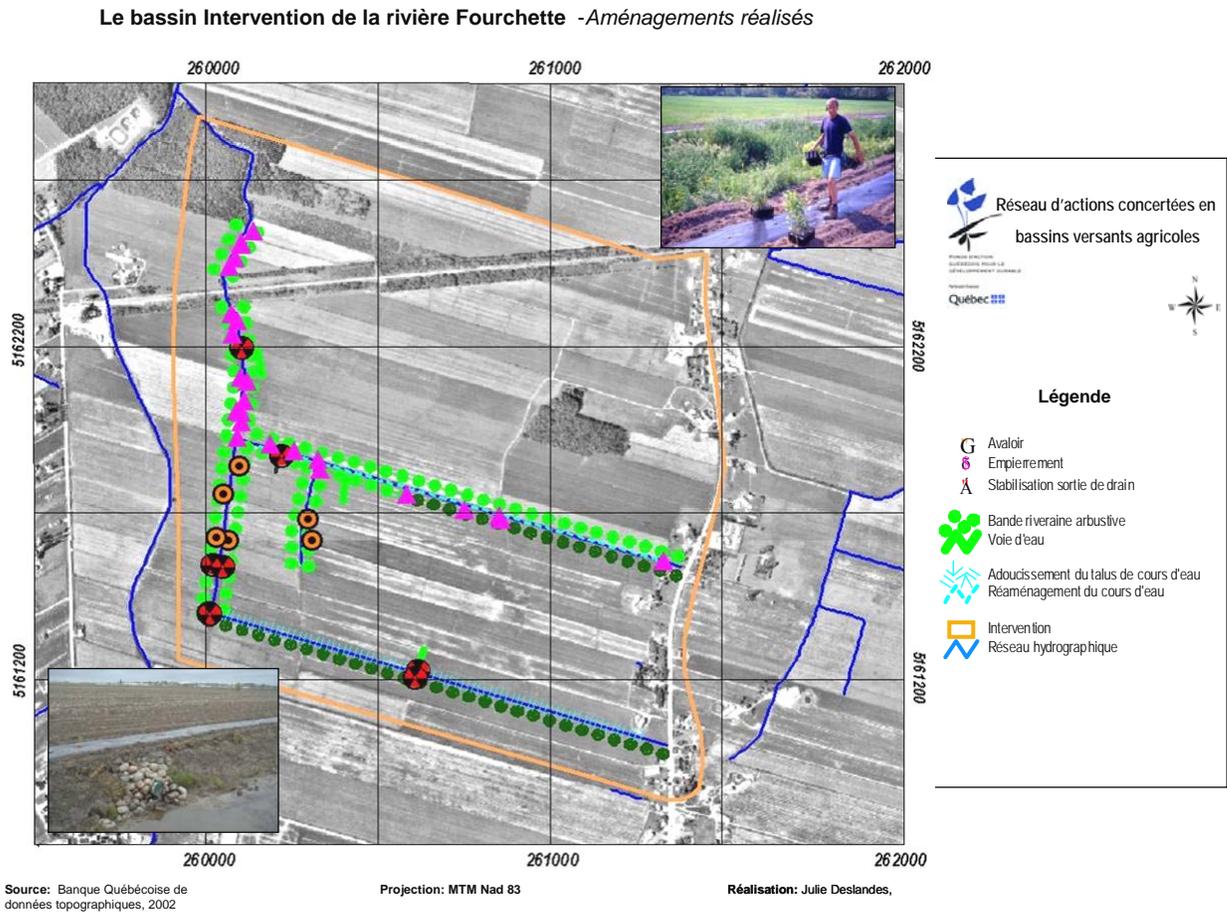


Figure 8. Cartographie des aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant du ruisseau Fourchette (Michaud et coll., 2004).

Tableau 1. Aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant du ruisseau Fourchette.

Description des aménagements	
Réaménagement de cours d'eau	1 250 mètres
- adoucissement des talus (pente 1,5 / 1)	
- stabilisation des talus par ensemencement herbacé	
- nettoyage du fond du cours d'eau jusqu'au niveau initiale	
Correctifs au talus de cours d'eau	
- adoucissement des talus (pente 1,5 / 1)	
- avec stabilisation des talus par ensemencement herbacé	
- avec stabilisation des talus (biogénie)	
Bande riveraine arbustive	4 490 mètres
- plantation d'une rangée d'arbuste le long des rives de cours d'eau.	
Essences utilisées : Spirée, rosier, sureau, viorne trilobée, etc...	
Bande riveraine arborescente (haie brise-vent)	2 200 mètres
- plantation d'une rangée d'arbre le long des rives de cours d'eau.	
Essences utilisées : Chêne, noyer, érable argenté, argousier etc...	
Voie d'eau engazonnée	255 mètres
- voie d'eau engazonnée avec drain souterrain	
Stabilisation des sorties de drain	8 unités
- stabilisation des sorties de drains avec perré au bas du talus	
Stabilisation à l'embouchure des rigoles ou dépressions	24 unités
- déversoir empierré dans le talus à l'embouchure de rigole ou de dépressions.	
Avaloir et bassins de captage	6 unités
- avaloir de 150 mm de diamètre installé dans des fossés existants ou des dépressions.	
Tranchée filtrante	3 unités

2.1.2 Bilan agronomique

Les bilans agronomiques des exploitations agricoles localisées dans les bassins Témoin et Intervention ont été coordonnés par les conseillers du Club de fertilisation de la Beauce (CFB), de concert avec les propriétaires. Les bilans agronomiques des bassins expérimentaux du ruisseau Fourchette compilés en période de référence et en période d'évaluation (tableau 2) mettent en relief des différences importantes entre les périodes de référence et d'évaluation, notamment une diminution considérable de la superficie en cultures annuelles en période d'évaluation dans le bassin Témoin, au profit des prairies. La superficie du bassin en cultures annuelles passe en effet de 23 % en période de référence à 11 % en période d'évaluation. Le bilan des apports en phosphore (P) du bassin Témoin a aussi sensiblement diminué en période d'évaluation, par rapport à la période de référence, passant de 31 kg/ha à 20 kg/ha. La proportion de la superficie du bassin en cultures annuelles au bassin Intervention (38 %) demeure pour sa part relativement stable entre les périodes de référence et d'évaluation. Il en est de même pour le bilan des apports en P (15 kg P/ha). Notons enfin la transition au travail primaire

printanier du sol (chisel) dans le bassin Intervention pour une portion significative du parcellaire en cultures annuelles (47 %).

En somme, pour les fins de l'interprétation des tendances de la qualité de l'eau aux exutoires des bassins versants expérimentaux du ruisseau Fourchette, retenons que la pression agroenvironnementale exercée par le système de culture dans le bassin Témoin est nettement moindre en période d'évaluation qu'en période de référence, tant au plan des apports que de la pratique culturale. Cette considération est importante compte tenu de l'approche utilisée dans la détection de tendances dans l'évolution de la qualité de l'eau au bassin Intervention. Les observations de qualité de l'eau du bassin Témoin sont en effet utilisées comme balise (covariable) dans l'analyse des données du bassin Intervention.

Tableau 2. Bilan agronomique des bassins versants expérimentaux du ruisseau Fourchette pour la période de référence et d'évaluation.

	Période de référence		Période d'évaluation	
	Témoin	Intervention	Témoin	Intervention
Utilisation du sol				
Superficie total du bassin (hectares)	192	250	192	250
Cultures annuelles (%)	23%	39%	11%	37%
Cultures pérennes (%)	24%	40%	37%	42%
Boisé (%)	38%	8%	38%	8%
Autres (%)	14%	13%	14%	13%
Épandage d'engrais de ferme				
Superficie en culture recevant des engrais de ferme (%)	92%	74%	100%	84%
Engrais de ferme appliquée durant la période de croissance des plantes (%)	100%	76%	89%	92%
Bilan agronomique				
Bilan agronomique annuel de l'azote (kg-N / ha en culture) ¹	-23	-30	-39	-12
Bilan annuel d'apport de phosphore à la surface du sol (kg P / ha en culture) ²	31	15	20	16
Pratique culturale (cultures annuelles)				
Labour à l'automne	100%	67%	100%	53%
Herse à disque à l'automne				
Chisel à l'automne		33%		
Chisel au printemps				47%
Aucun travail à l'automne (semis direct)				

2.1.3 Bilan hydrique

Les hauteurs de précipitations et de lame d'eau exportées aux exutoires des bassins expérimentaux du ruisseau Fourchette pour les périodes de référence et d'évaluation sont rapportées au tableau 3. Ces observations mettent en relief des gradients spatio-temporels importants au plan hydrologique. D'une part, il s'avère que la période d'évaluation a été associée à des précipitations nettement plus importantes qu'en période de référence. Ce gradient temporel dans les précipitations se traduit en différences importantes dans les lames d'eau exportées aux exutoires des bassins versants. Ainsi, la lame d'eau annuelle passe de 639 mm/an en période de référence au bassin Témoin à 844 mm en période d'évaluation. Le bassin Intervention présente aussi un gradient temporel dans ses lames d'eau exportées, mais relativement moins important que le bassin Témoin. La lame

d'eau exportée y passe de 655 à 729 mm/an respectivement entre la période de référence et la période d'évaluation. Le tableau 3 met en relief que la strate de débits de crue (> 1,4 mm/jour) en saison de production (mai à novembre) contribue à la plus large part de l'augmentation des lames d'eau exportées en période d'évaluation. Les précipitations d'intensité et d'abondance exceptionnellement élevées de l'automne 2005 (ouragan Katrina), du printemps 2006 et de l'automne 2006 expliquent ces réponses hydrologiques de forte amplitude.

Tableau 3. Durée et hauteurs des lames d'eau exportées correspondantes aux strates de débits retenues pour le calcul des flux aux bassins Témoin et Intervention du ruisseau Fourchette.

BASSIN TÉMOIN								
Stratifications								
Ident. No.	Débit (mm jr ⁻¹)	Saison (mo/jr)	Jours	Période de référence		Période d'évaluation		
				Lame d'eau exportée		Jours	Lame d'eau exportée	
1	< 1,4	05/01 - 12/01	224	109 mm	0,50 mm/jour	305	229 mm	0,74 mm/jour
2	<1,4	12/01 - 05/01	210	109 mm	0,53 mm/jour	214	115 mm	0,54 mm/jour
3	> 1,4	05/01 - 12/01	92	167 mm	6,68 mm/jour	184	719 mm	3,91 mm/jour
4	> 1,4	12/01 - 05/01	41	615 mm	4,04 mm/jour	119	839 mm	7,06 mm/jour
Global			567	1 000 mm	639 mm/an	822	1 901 mm	844 mm/an

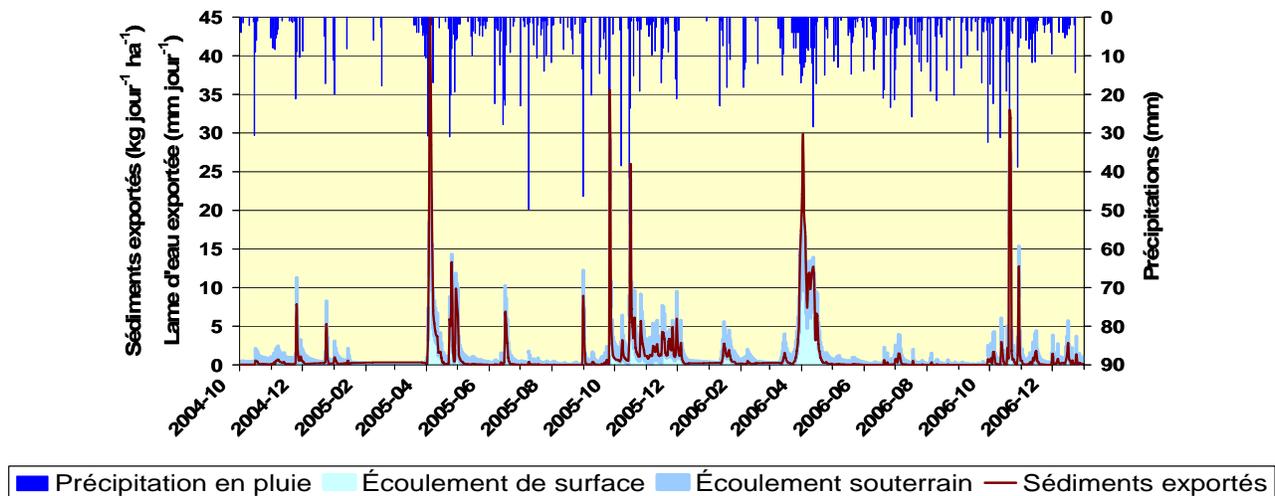
BASSIN INTERVENTION								
Stratifications								
Ident. No.	Débit (mm jr ⁻¹)	Saison (mo/jr)	Jours	Période de référence		Période d'évaluation		
				Lame d'eau exportée		Jours	Lame d'eau exportée	
1	< 1,4	05/01 - 12/01	214	96 mm	0,45 mm/jour	339	190 mm	0,56 mm/jour
2	<1,4	12/01 - 05/01	204	100 mm	0,48 mm/jour	224	123 mm	0,56 mm/jour
3	> 1,4	05/01 - 12/01	51	184 mm	3,62 mm/jour	150	670 mm	4,52 mm/jour
4	> 1,4	12/01 - 05/01	98	640 mm	6,54 mm/jour	109	658 mm	6,08 mm/jour
Global			567	1 018 mm	655 mm/an	822	1 642 mm	729 mm/an

La figure 9 et le tableau 4 rapportent les résultats de la segmentation des hydrogrammes en composantes de surface et souterraine, de même que les exportations de sédiments estimées sur la base des signaux géochimiques captés par les sondes multi-paramètres aux exutoires des bassins Intervention et Témoin du ruisseau Fourchette pour la période d'évaluation. Ces estimations sont basées sur l'étude individuelle de 30 crues des ruisseaux entre novembre 2004 et novembre 2006. Dans l'ensemble, les séparations des hydrogrammes mettent en relief l'importante contribution du dégel printanier au bilan hydrique dans cette région. Les pics de débits associés au dégel printanier comportent en effet une forte composante de ruissellement, qui contribue pour une large part à la hauteur d'eau ruisselée au cours de l'année. On remarque aussi les contributions importantes du ruissellement de surface aux crues automnales de 2005 et 2006, de même qu'au printemps 2006, en réponse à des précipitations exceptionnellement abondantes.

Globalement, la séparation des hydrogrammes témoignent d'une activité hydrologique de surface plus intense au bassin Témoin qu'au bassin Intervention, malgré une utilisation

du sol pourtant moins intensive. Le couvert forestier y est en effet plus important, couvrant 38 % de la superficie totale du bassin Témoin, alors que la forêt ne compte que pour 8 % du bassin versant Intervention. Les facteurs hydro-pédologiques expliqueraient ainsi les différences dans l'activité hydrologique de surface des deux bassins versants. Notons que le bassin Témoin occupe une position inférieure dans le paysage du bassin versant, alors que son exutoire se situe 15 mètres plus bas que celui du bassin Intervention. La cartographie très détaillée des sols des bassins versants expérimentaux réalisée par Martin et coll. (2006) indique par ailleurs que 25 % de la superficie du bassin Témoin se voit attribuée la classe de drainage « Très mal drainée », alors que cette classe ne représente que 10 % de la superficie du bassin Intervention. Enfin, le relief vallonné du bassin Témoin favorise la génération de ruissellement, alors que les dépressions sont enclines à développer rapidement un état de saturation.

Fourchette Intervention



Fourchette Témoin

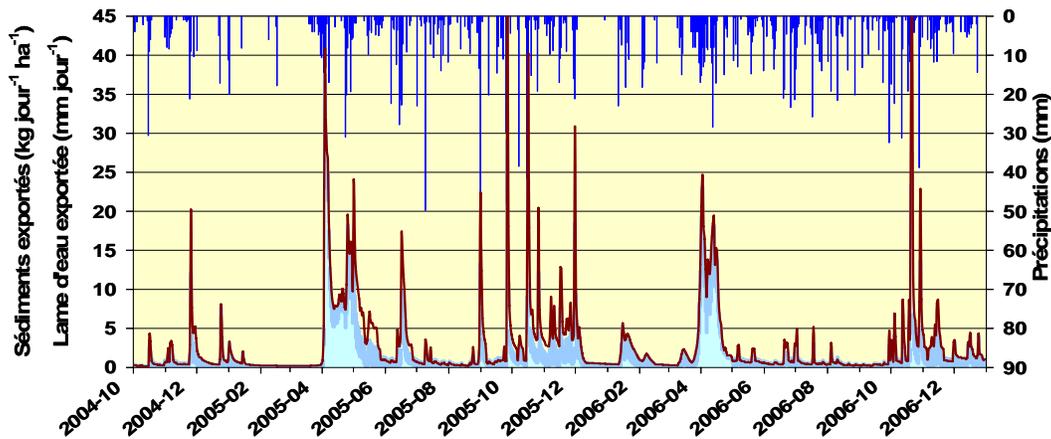


Figure 9. Résultats de la segmentation des hydrogrammes en composantes de surface et souterraine aux exutoires des bassins versants Fourchette Témoin et Intervention.

Tableau 4. Segmentation des lames d'eau en composantes de surface et souterraine sur la base des signaux géochimiques captés par les sondes multiparamètres aux exutoires des bassins Intervention et Témoin du ruisseau Fourchette pour les années de référence 2005 et 2006.

	Bassin Témoin	Bassin Intervention
Saison 2005 (avril à décembre)		
Période de référence	224 jours	211 jours
Lame d'eau exportée (mm)	863	572
Écoulement souterrain (mm)	393	371
% souterrain	46%	65%
Saison 2006 (avril à décembre)		
Période de référence	216 jours	221 jours
Lame d'eau exportée (mm)	410	307
Écoulement souterrain (mm)	231	210
% souterrain	56%	68%

2.1.4 Flux de sédiments et nutriments

L'ensemble des résultats de la modélisation des flux de MES, de phosphore (total, biodisponible, total en solution et biodisponible), d'azote (nitrates et ammoniacal) et de calcium pour chacune des strates de débit du ruisseau (base vs crue) et de saison (production vs hiver) sont rapportés en annexe V pour chacun des bassins versants (Témoin et Intervention) et les deux périodes à l'étude (référence et évaluation). Le tableau 5 met pour sa part en relief les différences dans les concentrations moyennes pondérées pour le débit et les charges exportées de matières en suspension et de nutriments aux exutoires des bassins versants Fourchette, Intervention et Témoin, pour l'ensemble des périodes de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).

Tableau 5. Concentrations moyennes pondérées pour le débit et les charges exportées de matières en suspension et de nutriments aux exutoires des bassins versants expérimentaux Fourchette, Intervention et Témoin, pour la période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).

Paramètre de qualité de l'eau	Bassin Intervention						Bassin Témoin					
	Période de référence			Période d'évaluation			Période de référence			Période d'évaluation		
	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹
Matières en suspension	120 900	47 300	0.130	236 400	57 200	0.124	267 700	139 200	0.131	456 700	125 000	0.095
Phosphore total	577	226	0.063	1 063	257	0.064	699	364	0.108	1 217	333	0.089
Phosphore biodisponible	371	145	0.062	668	164	0.065	345	180	0.115	606	166	0.097
Phosphore total dissous	309	121	0.071	549	133	0.073	186	97	0.154	358	98	0.143
Phosphore réactif dissous	279	109	0.077	496	120	0.078	156	81	0.196	308	84	0.155
Azote ammoniacal	966	378	0.127	831	201	0.104	1 633	849	0.153	1 981	542	0.480
Nitrates	13 141	5 149	0.038	14 293	3 458	0.069	6 742	3 505	0.040	9 550	2 614	0.037
Calcium	130 336	51 066	0.047	187 700	45 414	0.030	43 069	22 389	0.031	60 700	16 630	0.026
Hauteur d'eau exportée	1020 mm			1652 mm			1011 mm			1922 mm		
Durée du monitoring	567 jours			822 jours			567 jours			822 jours		

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

Globalement, les modèles de flux générés démontrent un bon ajustement statistique tel que révélé par des coefficients de variation, estimés par la méthode de validation croisée (Jack-knife), compris entre 5 et 15 %, à l'exception de l'ammoniac dans le bassin Témoin. Les charges de MES, P, N et Ca plus élevées en période d'évaluation dans les deux bassins versants témoignent en large partie d'une période de suivi plus longue en période d'évaluation (822 jours, contre 567 en période de référence) et conséquemment d'une lame d'eau exportée plus importante (tableau 3). Aussi, les charges spécifiques annualisées (kg/ha-an) traduisent mieux l'influence des conditions hydrologiques et de l'occupation du sol sur la qualité de l'eau au cours des deux périodes à l'étude. Ramenées sur une base annuelle, les charges de MES et de P total au bassin Témoin passent respectivement de 850 t/ha de sédiments et 2,35 kg P/ha en période de référence à 1 057 t/ha et 2,82 kg P/ha en période d'évaluation. Ces taux d'exportation de sédiments et de P demeurent largement plus élevés qu'au bassin Intervention, où les charges annuelles de sédiments et de P passent respectivement de 311 t/ha et 1,49 kg P/ha en période de référence, à 420 t/ha et 1,89 kg P/ha en période d'évaluation. Ces taux d'exportation beaucoup plus élevés dans le bassin Témoin, malgré une occupation des sols pourtant moins intensive, reflètent essentiellement l'influence des conditions hydrologiques à l'œuvre dans ce bassin versant et mises en relief par les relevés hydrométriques et la segmentation des hydrogrammes discutés précédemment. L'intense activité hydrologique de surface, tributaire des propriétés des sols et du paysage, se traduit ainsi par des taux élevés d'exportation de sédiments et de P.

L'influence des conditions hydrologiques fortement contrastées entre les périodes de référence et d'évaluation sur les exportations de sédiments et de phosphore est particulièrement bien mise en relief à la figure 10. Cette dernière illustre les séries chronologiques de flux de phosphore total et de matières en suspension pour les bassins Témoin et Intervention et les périodes de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006). Les années hydrologiques 2001/2002 et 2002/2003 se résument à des crues printanières modérées et une seule crue estivale d'importance en juillet 2002. La période d'évaluation a pour sa part connu de nombreuses crues automnales à forte composante de ruissellement de surface. En 2005, les suites de Katrina balayaient le nord-est du continent, alors que le printemps et l'automne 2006 ont aussi été exceptionnellement pluvieux. Les gradients temporels (période de référence vs d'évaluation) sont particulièrement mis en évidence par les charges de MES et de P. Globalement, l'augmentation des hauteurs d'eau exportées en période d'évaluation s'est traduite respectivement en augmentations de 24 % et 20 % des flux (annualisés) de MES et de P total au bassin Témoin. L'augmentation des flux est encore plus sensible au bassin Intervention, alors qu'elles se situent dans l'ordre de 35 % et 27 % respectivement pour les MES et le P total.

Les augmentations des concentrations moyennes (pondérées pour le débit) en MES et P au bassin Intervention au cours de la période d'évaluation (tableau 5) sont attribuées à la forte érosivité des pluies au cours de cette période, particulièrement en saison de production. Cependant, contrairement au bassin Intervention, les concentrations

pondérées pour le débit en MES et en P du bassin Témoin ne s'accroissent pas en période d'évaluation. L'augmentation des superficies en prairie (de 24 % à 37 % de la superficie totale du bassin) au détriment des cultures annuelles, conjuguée à une réduction des apports de P en période d'évaluation, aurait en partie tamponné l'effet des conditions hydrologiques à plus forte composante de ruissellement de surface.

L'étude des différentes fractions du P exporté met par ailleurs en relief des spéciations fortement contrastées entre les bassins. La fraction particulaire du P exportée au bassin Témoin (comprise entre 70 et 73 % du P total respectivement pour les périodes de référence et d'évaluation) demeure beaucoup plus élevée que la fraction particulaire du P exportée au bassin Intervention (47 % du P total). Cette spéciation contrastée des flux de P reflète les taux d'érosion relativement plus élevés dans le bassin Témoin. Il est aussi probable que la proportion relativement plus importante du bilan hydrique qui transite par les drains souterrains au bassin Intervention, conjuguée à la nature des sols à dominance argileuse, ait favorisé le transfert préférentiel de P par les drains souterrains. Plusieurs études québécoises récentes ont effectivement démontré l'importance de ce phénomène en sols argileux, où le P exporté au drain est caractérisé par une fraction soluble relativement plus importante que dans le ruissellement de surface (Michaud et coll., 2009b ; Enright et Madramootoo, 2004; Jamieson et coll., 2004). Notons par ailleurs que la dominance des formes solubles de P exportées du bassin Intervention se traduit en une biodisponibilité relativement plus élevée du phosphore total (64 %) qu'au bassin Témoin (50 %). On remarque cependant que la biodisponibilité du P particulaire au bassin Témoin (30 %) demeure relativement plus élevée qu'au bassin Intervention (24 %), un gradient généralement lié au taux d'enrichissement des sols en P (Michaud et Laverdière, 2005). Globalement, la richesse moyenne en P total associée aux sédiments exportés des bassins Témoin et Intervention se situe respectivement à 1 900 et 2 200 mg/kg P. Cette richesse des sédiments en P total traduit un taux d'enrichissement par rapport au sol de la couche arable (généralement situé entre 700 et 800 mg/kg) de l'ordre de 2,5, soit un taux représentatif de ce qui est généralement rapporté dans la littérature.

En ce qui a trait aux concentrations observées en nitrates et en calcium, on dénote une tendance à la baisse en période d'évaluation pour les deux bassins versants. Cette diminution dans les concentrations moyennes pondérées est cohérente avec l'augmentation de l'activité hydrologique de surface documentée pour les deux bassins expérimentaux. En effet, tant les nitrates que le Ca sont reconnus pour leur affinité aux cheminements hydrologiques souterrains. Des concentrations moins élevées en nitrates et calcium observées aux exutoires des deux bassins au cours de la période d'évaluation témoignent une fois de plus de contributions relativement plus importantes du ruissellement de surface au bilan hydrique des deux bassins versants expérimentaux au cours de cette période.

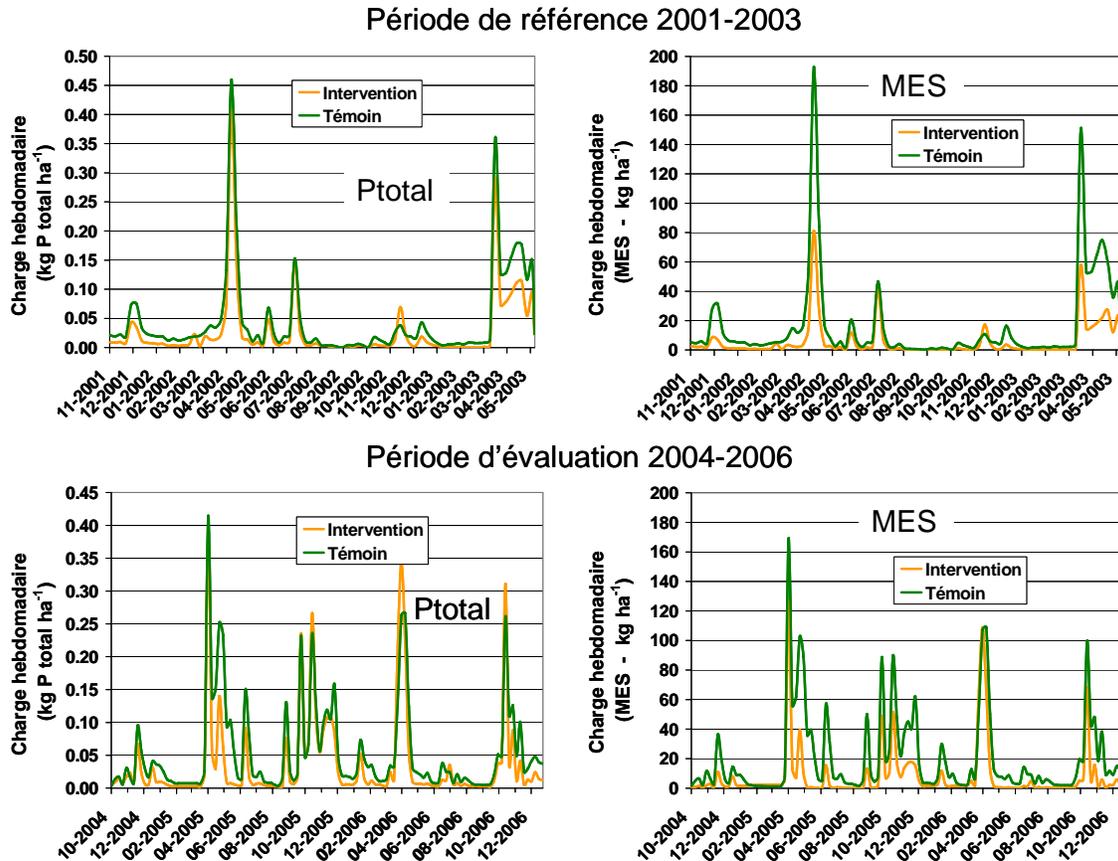


Figure 10. Flux hebdomadaires de matières en suspension et de phosphore total estimés pour les bassins versants Intervention et Témoin du ruisseau Fourchette en période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).

2.1.5 Réponse de la qualité de l'eau à l'action concertée

Le tableau 6 résume les résultats de l'ANCOVA appliquée aux paramètres MES, P total, P biodisponible, P en solution et Ca. Globalement, les observations colligées aux bassins Témoin et Intervention pour l'ensemble des paramètres demeurent fortement corrélées, comme en font foi les valeurs F et les niveaux de probabilité associés à l'effet de la covariable (Témoin) et rapportés au tableau 6. Cette forte relation détectée entre les observations provenant d'échantillonnages simultanés aux exutoires des bassins Témoin et Intervention témoigne de leur dépendance commune à l'activité hydrologique à l'œuvre sur le territoire. Un effet de la période (référence vs évaluation) est détecté pour les paramètres de qualité de l'eau MES, P bio, P soln et Ca. L'interaction avec la saison, significative pour MES, P soln et Ca implique que les résultats associés à ces paramètres doivent être interprétés de façon distincte pour chacune des saisons (tableau 7).

Matières en suspension : La figure 11 illustre les résultats de l'analyse de covariance (ANCOVA) des concentrations ponctuelles en matières en suspension observées à l'exutoire du bassin Fourchette Intervention, en utilisant les observations du bassin

Témoin en covariable. Rappelons ici que les 279 échantillonnages pratiquement synchrones des bassins, à raison de trois prélèvements par crue, représentent un vaste éventail de conditions hydrologiques associées à la grande majorité des exportations annuelles de sédiments et de nutriments aux exutoires des bassins expérimentaux. Compte tenu de la forte saisonnalité observée dans les relations concentration/débit de la plupart des paramètres de qualité de l'eau des deux bassins expérimentaux, l'analyse de covariance a pris en compte le facteur saisonnier dans la détection de tendances entre les périodes de référence et d'évaluation. Les résultats de l'ANCOVA mettent en relief une réduction de 35 % de la concentration en MES en période d'évaluation, par rapport à la période de référence, en s'appuyant sur les observations colligées pour le bassin Témoin. Cette réduction significative ($p < 0,05$) ne s'applique cependant qu'à la saison de production (mai à novembre), alors que les concentrations hivernales en MES en période d'évaluation ne diffèrent pas significativement des observations de la période de référence.

Cette réduction significative des concentrations en MES lors des crues du bassin Intervention est attribuée essentiellement aux aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant. Rappelons que des portions importantes des rives des cours d'eau du bassin Intervention étaient soumises à des processus actifs d'érosion en période de référence. L'aménagement systématique de bandes riveraines et le contrôle de sources ponctuelles d'érosion auraient eu un effet significatif sur le taux de sédiments exportés à l'exutoire du bassin en atténuant les principaux foyers d'érosion riveraine et en atténuant la connectivité hydrologique entre les champs et les cours d'eau. Un effet non détecté en conditions automnales tardives et printanières hâtives (saison hivernale) indiquerait que les aménagements anti-érosifs implantés dans le bassin Intervention seraient relativement moins efficaces en période hivernale qu'en saison de production. Un état généralisé de saturation du sol, encouragé par le gel et par une position élevée de la nappe, favorisant les transferts de surface, expliquerait cette saisonnalité.

Rappelons par ailleurs que le bassin Témoin, qui sert de balise dans le présent dispositif, a profité de conditions culturales beaucoup moins érosives en période d'évaluation (11 % de la superficie en cultures annuelles) qu'en période de référence (23 % de la superficie en cultures annuelles). Ce gradient dans l'occupation du sol au bassin Témoin renforce la thèse d'une influence marquée des aménagements hydro-agricoles sur la réduction de l'exportation de sédiments au bassin Intervention.

Tableau 6. Valeurs F et probabilités associées aux effets et interactions du modèle d'analyse de covariance appliquées aux observations de qualité de l'eau de la strate de débits de crue (débit journalier > 1,4 mm/jour) du bassin Fourchette Intervention utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.

		Effets et interactions du modèle ANCOVA (N=275 à 279)						
Paramètre	Valeur F Prob >F	PERIODE	SAISON	PERIODE TÉMOIN	TÉMOIN*	TÉMOIN*	TÉMOIN*	
				*SAISON (Covariable)	PÉRIODE	SAISON	PÉRIODE *SAISON	
	Valeur F	0,05	2,47	7,49	105,54	-	-	-
MES	Pr > F	0,8297	0,1173	0,0066	<.0001	-	-	-
	Valeur F	1.22	0.02	0.58	125.20	-	-	-
PTOT	Pr > F	0.2700	0.8761	0.4479	<.0001	-	-	-
	Valeur F	4.57	0.00	0.67	122.28	-	-	-
Pbio	Pr > F	0.0334	0.9446	0.4143	<.0001	-	-	-
	Valeur F	0,99	0,19	8,71	133,64	-	-	-
Psoln	Pr > F	0,3214	0,6626	0,0034	<.0001	-	-	-
	Valeur F	17,78	21,2	4,45	229,14	18,09	18,31	4,8
Ca	Pr > F	<.0001	<.0001	0,0358	<.0001	<.0001	<.0001	0,0297

Tableau 7. Moyennes (anti-log) ajustées au modèle de covariance des observations de qualité de l'eau de la strate de débits de crue (débit journalier > 1,4 mm/jour) du bassin Fourchette Intervention utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.

Paramètre	Moyennes (anti-log) ajustées				Différences	
	Au modèle de covariance (N=275 à 279)				Pour l'effet Période ⁽¹⁾	
	Référence Hiver	Référence Production	Évaluation Hiver	Évaluation Production	Production	Hiver
MES (mg L⁻¹)	22,7	27,0	33,0	17,4	-35% *	NS
PTOT (ug L⁻¹)	175	183	202	188	NS	NS
Pbio (ug L⁻¹)	111	104	123	132	+26% *	NS
Psoln (ug L⁻¹)	91	91	98	98	NS	NS
Ca (mg L⁻¹) ⁽²⁾	43,8	54,8	51,9	51,6	NS	+18 *

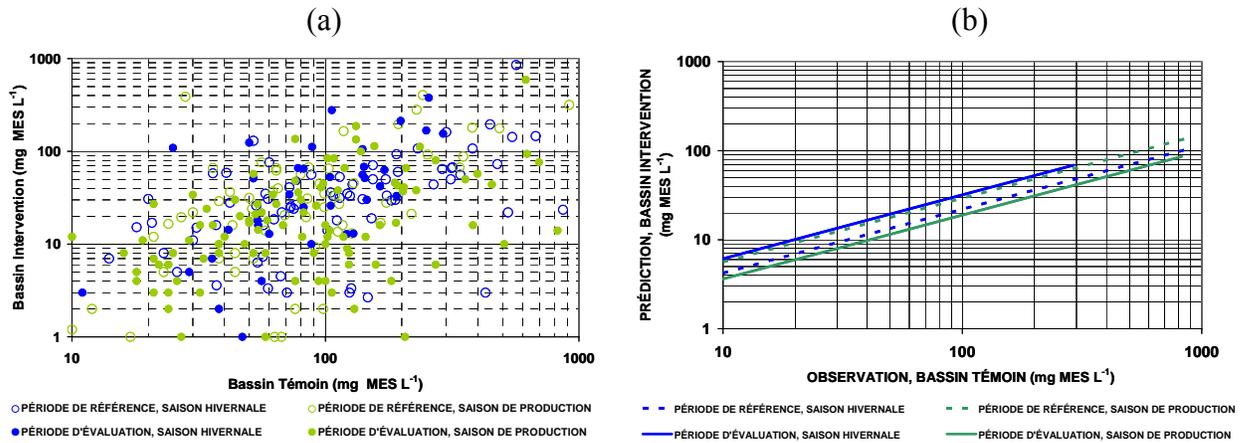


Figure 11. Concentrations en matières en suspension observées aux bassins Fourchette Intervention et Témoin pour les périodes de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006), et pour la saison hivernale (décembre à avril) et de production (mai à novembre) (a); prédictions des concentrations en MES au bassin Intervention selon le modèle d'analyse de covariance utilisant les observations jumelées du bassin Témoin comme covariable (b).

Phosphore : Les résultats de l'analyse de covariance ne permettent pas de détecter de différences significatives entre les périodes dans les concentrations en P total au bassin Intervention. Cette situation est *a priori* surprenante, puisque les concentrations en P total, sont généralement dominées par les formes particulières et associées aux concentrations de MES. Manifestement, les paramètres MES et P total n'ont pas suivi la même tendance dans le cas des bassins à l'étude. Deux considérations sont mises de l'avant pour expliquer ce phénomène. Rappelons d'une part que la réduction de l'exportation de sédiments au bassin Intervention est principalement tributaire de la correction des foyers généralisés d'érosion en rive. Typiquement, ces sédiments présentent un taux de richesse relativement moins élevé que les sédiments provenant des champs, qui profitent pour leur part d'apport réguliers d'engrais de ferme et d'engrais minéraux.

D'autre part, rappelons que le bilan des apports en P de même que les superficies en cultures annuelles étaient réduits de moitié en période d'évaluation au bassin Témoin (tableau 2), alors qu'ils demeuraient sensiblement les mêmes dans le bassin Intervention au cours des deux périodes d'étude. Cette importante atténuation de la pression agroenvironnementale dans le bassin Témoin expliquerait d'ailleurs la baisse de la concentration moyenne pondérée pour le débit en P total en période d'évaluation (tableau 5), malgré une activité hydrologique relativement plus intense qu'en période de référence. Cette tendance n'est pas observée au bassin Intervention. Compte tenu du recours au bassin Témoin comme covariable dans la détection d'une réponse de la qualité de l'eau au bassin Intervention, l'amélioration relative de la qualité de l'eau dans le bassin Témoin réduit d'autant la possibilité de détecter une évolution favorable des exportations de P au bassin Intervention.

Compte tenu des changements importants intervenus dans la régie du parcellaire au bassin Témoin, les résultats de l'analyse ANCOVA ne permettent pas d'exclure des retombées positives sur l'exportation diffuse de P total au bassin Intervention en réponse

à l'aménagement concerté du bassin versant. Ces résultats témoignent cependant de l'influence déterminante du type de culture sur la mobilité du phosphore. Dans la présente étude de cas, la transition aux cultures herbagères (bassin Témoin) aura eu un impact relativement plus important sur la mobilité du phosphore que l'aménagement hydro-agricole systématique des rives du bassin versant Intervention.

L'augmentation relative (par rapport au bassin Témoin) de la concentration en P biodisponible au bassin Intervention en période d'évaluation s'expliquerait par les mêmes considérations évoquées pour le P total, soit la réduction importante de la pression agroenvironnementale dans le bassin Témoin. Celle-ci s'est notamment traduite par une réduction de la concentration moyenne pondérée en P biodisponible au bassin Témoin, alors qu'elle augmente au bassin Intervention en période d'évaluation. Ce gradient dans les concentrations n'a eu aucun effet significatif sur les proportions relatives des formes de P et la biodisponibilité, qui sont demeurées stables, bien que fortement contrastées, aux exutoires des deux bassins à l'étude. L'augmentation relative de 26 % de la concentration en P biodisponible au bassin Intervention en période d'évaluation ne s'explique donc pas par un changement dans la spéciation du P exporté, mais bel et bien par une augmentation relative de l'exportation au bassin Intervention, comparativement à celle du bassin Témoin.

Une implication concrète de ces gradients observés dans la qualité de l'eau et l'occupation des sols dans les bassins expérimentaux du ruisseau Fourchette met en relief l'importance à accorder au cumul des lignes de défense agroenvironnementales afin de réduire de façon tangible les exportations diffuses de sédiments et de nutriments. Les cultures pérennes et les pratiques culturales anti-érosives (culture sur résidus et cultures de couverture) agissent en amont des aménagements hydro-agricoles dans la prévention de l'érosion des sols et le transfert de nutriments dans le ruissellement de surface. La pertinence agroenvironnementale des cultures herbagères et des pratiques agricoles anti-érosives est d'autant plus importante dans cette région d'étude, où les conditions agroclimatiques et les propriétés des paysages favorisent l'émission d'un abondant ruissellement de surface.

2.2 Ruisseau Walbridge

Les bassins versants expérimentaux Témoin (7,9 km²) et Intervention (6,3 km²) du ruisseau Walbridge se situent dans la portion aval de la rivière aux Brochets (figure 12), principal tributaire de la baie Missisquoi du grand lac Champlain. La rivière aux Brochets draine un bassin versant d'une superficie d'environ 630 km², dont une partie (99 km²) se situe au Vermont. Le ruisseau Walbridge a été identifié parmi les principaux contributeurs de phosphore (P) à la baie Missisquoi en territoire québécois (Deslandes et coll., 2002). Ces eaux transfrontalières sont affectées par une prolifération récurrente de cyanobactéries qui y perturbe l'approvisionnement en eau potable et mine le potentiel récréotouristique de la région. Reconnaisant le rôle déterminant des apports de P sur la dégradation de l'écosystème de la baie, une entente spécifique sur la réduction des charges de P dans la baie Missisquoi est intervenue entre les gouvernements du Québec et

du Vermont en août 2002. L'entente cible le critère de concentration de 25 µg P L-1 dans les eaux de la baie et définit un partage de responsabilité pour l'atteinte d'une charge cible totale de phosphore dans la baie Missisquoi de 97 t P an-1 (Gouvernement du Québec et de l'état du Vermont, 2002). L'effort de réduction de la charge de phosphore pour le Québec (40 %) représente 27 t P an-1, alors qu'il se situe à 43 t P an-1 au Vermont (60 %). Dans les deux cas, il s'agit d'une réduction d'environ 41 % de la charge annuelle totale de référence établie pour l'année 1991. Cette réduction des flux de P dans la baie Missisquoi interpelle particulièrement le monde agricole. En effet, environ 79 % de la charge annuelle de P vers la baie (143 t P) est attribuée à l'agriculture, qui occupe 26 % du bassin versant (Hegman et al., 1999).

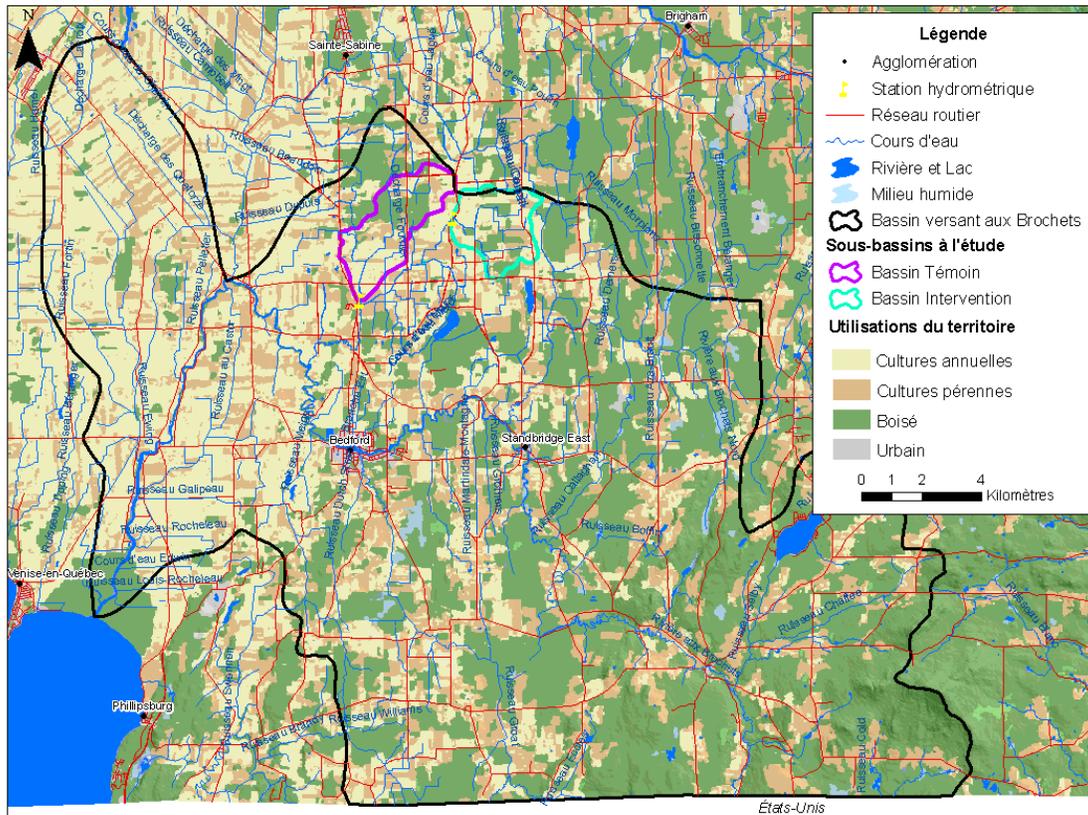


Figure 12. Localisation des bassins Témoin et Intervention du ruisseau Walbridge à l'intérieur du bassin versant de la rivière aux Brochets.

La participation des bassins jumeaux du ruisseau Walbridge au réseau d'action concertée en bassins versants agricoles s'inscrivait dans un ensemble d'études à caractère agroenvironnemental initiées en 1997 dans le bassin versant de la rivière aux Brochets, comportant notamment des volets d'études à l'échelle de la parcelle expérimentale (Michaud et Laverdière, 2004), du champ (Enright et Madramootoo, 2004), du sous-bassin versant (Michaud et coll., 2005) et du bassin versant (Deslandes et coll., 2002). La nature multidisciplinaire des travaux et la diversité des échelles d'étude de ces projets de « recherche-action », réalisés en collaboration avec des entreprises et conseillers agricoles de la région, avaient permis d'apporter une meilleure compréhension de la dynamique

globale du phosphore dans les systèmes de production agricole, les sols et l'écosystème aquatique du bassin versant. Dans une perspective opérationnelle, le dispositif d'étude en bassins versants jumeaux du ruisseau Walbridge s'inscrivait en complémentarité de ces études en ciblant l'évaluation des retombées environnementales associées à des actions concertées à l'échelle du bassin versant. À l'instar des dispositifs des bassins Fourchette et La Guerre, la démarche s'est appuyée sur le suivi de la qualité de l'eau d'un ruisseau d'un bassin Témoin (7,9 km²), qui a servi de balise pour quantifier la réponse d'un ruisseau drainant un bassin Intervention (6,3 km²), bénéficiant d'une action concertée de ses propriétaires riverains. Le recours à un dispositif de bassins jumeaux et à deux périodes distinctes de suivi de l'écosystème aquatique (référence et évaluation) avait ainsi pour but de minimiser l'effet de la variabilité interannuelle des conditions climatiques sur la détection de tendances temporelles sur la qualité de l'eau.

2.2.1 Diagnostic et aménagement hydro-agricole

Les images multispectrales printanières du bassin versant Intervention de même que l'analyse hydrologique du modèle numérique d'élévation (annexe II et III) ont révélé quelques zones circonscrites du parcellaire qui présentaient des problèmes d'égouttement. Celles-ci étaient liées au profilage déficient du drainage de surface dans la portion aval du sous-bassin et à une rétention d'eau dans la portion centrale du bassin occasionnée par la sédimentation dans la branche principale du cours d'eau. Les rives de cours d'eau du bassin versant présentaient par ailleurs quelques foyers ponctuels d'érosion, associés généralement aux zones mal égouttées du parcellaire. Dans l'ensemble, la distribution et l'intensité de ces marques ponctuelles d'érosion n'étaient en rien comparables avec l'instabilité des berges de cours d'eau documentée pour les bassins Intervention du ruisseau Fourchette ou de la rivière La Guerre. Malgré un relief ondulé, le bassin versant Intervention du ruisseau Walbridge présentait ainsi un meilleur état de ses rives de cours d'eau que les autres bassins Intervention du réseau. La position relativement élevée de ce sous-bassin versant dans le relief d'ensemble du bassin Walbridge, de même qu'une dominance de sol à texture grossière, expliquerait cette vulnérabilité relativement moindre aux processus érosifs. Le bassin Témoin du ruisseau Walbridge occupe pour sa part une position relativement plus basse (60 à 80 m) que le bassin Intervention (73 à 103 m), avec une proportion plus élevée du parcellaire associée à la classe de drainage « Très mal drainée ».

Le tableau 8 énumère les aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant Intervention du ruisseau Walbridge. La localisation de ces travaux est illustrée à la figure 13. Les interventions réalisées au cours de l'année 2003 consistent notamment au profilage d'une section de 1 340 m de cours d'eau. Située au centre du bassin versant, cette section de cours d'eau portait un préjudice à l'égouttement du parcellaire localisé à sa périphérie et en amont. L'aménagement des branches de cours d'eau a été complété par l'ensemencement des talus vulnérables (565 m) ou leur stabilisation au moyen de génie végétal (150 m). L'implantation de 1 470 m de bande riveraine arbustive est venue assurer la protection des rives en portion aval du bassin. La correction de foyers d'érosion ou de zones ponctuelles de champs mal égouttés a requis pour leur part cinq avaloirs

avec bassins de captage, 8 déversoirs empierrés, 2 tranchées filtrantes et 2 stabilisations de sorties de drains.

Tableau 8. Aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant Intervention du ruisseau Walbridge.

Description des aménagements	
Réaménagement de cours d'eau	1 340 mètres
<ul style="list-style-type: none"> - adoucissement des talus (pente 1,5 / 1) - stabilisation des talus par ensemencement herbacé - nettoyage du fond du cours d'eau jusqu'au niveau initiale 	
Correctifs au talus de cours d'eau	565 mètres
<ul style="list-style-type: none"> - adoucissement des talus (pente 1,5 / 1) - avec stabilisation des talus par ensemencement herbacé - avec stabilisation des talus (biogénie) 	
Fossé reprofilé	325 mètres
<ul style="list-style-type: none"> - adoucissement des talus - stabilisation des talus par ensemencement herbacé - ajustement du fond (pente longitudinale et profondeur) 	
Bande riveraine arbustive	1 470 mètres
<ul style="list-style-type: none"> - plantation d'une rangée d'arbuste le long des rives de cours d'eau. Essences utilisées : Spirée, rosier, sureau, viorne trilobée, etc... 	
Voie d'eau engazonnée	
<ul style="list-style-type: none"> - voie d'eau engazonnée avec drain souterrain 	
Stabilisation des sorties de drain	2 unités
<ul style="list-style-type: none"> - stabilisation des sorties de drains avec perré au bas du talus 	
Stabilisation à l'embouchure des rigoles ou dépressions	8 unités
<ul style="list-style-type: none"> - déversoir empierré dans le talus à l'embouchure de rigole ou de dépressions. 	
Avaloir et bassins de captage	5 unités
<ul style="list-style-type: none"> - avaloir de 150 mm de diamètre installé dans des fossés existants ou des dépressions. 	

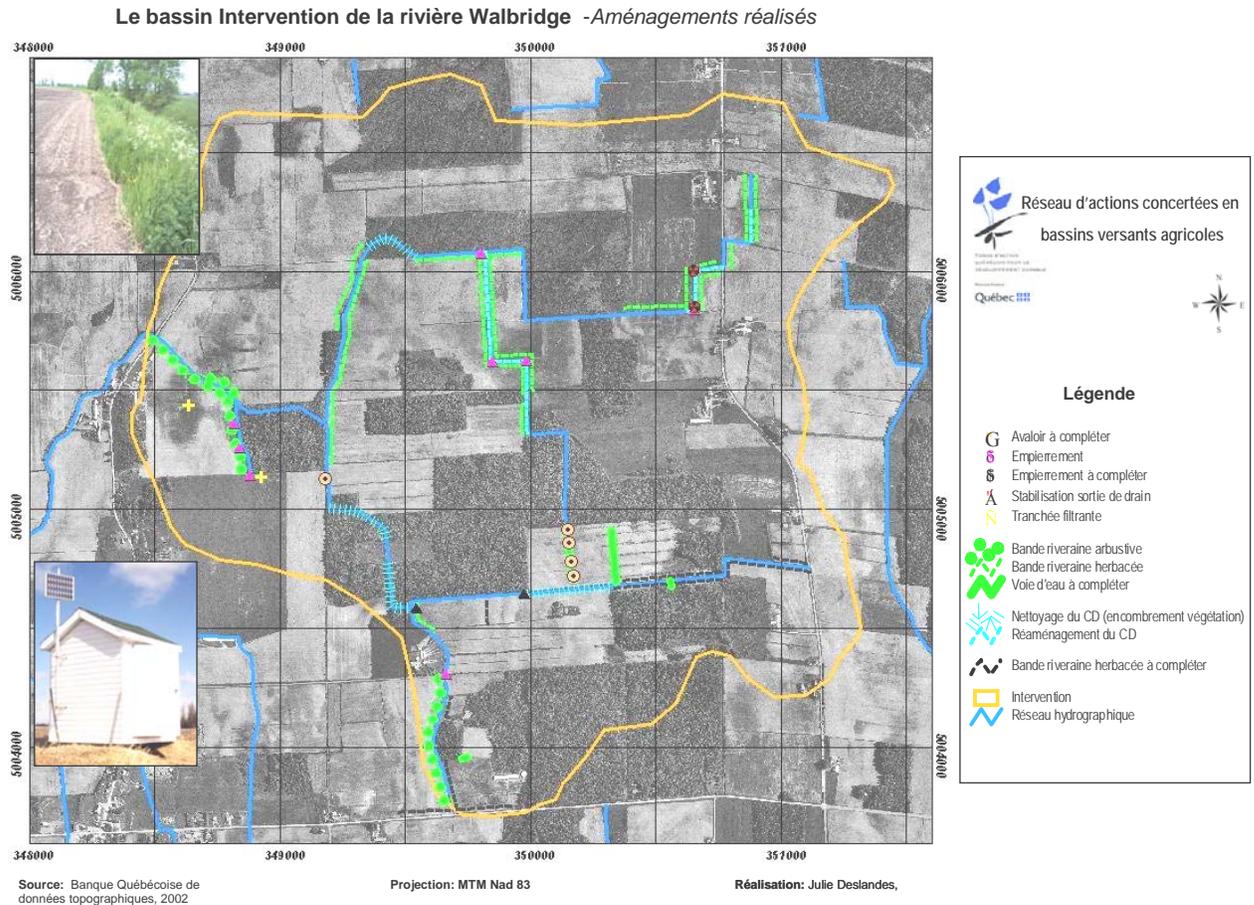


Figure 13. Localisation des aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin Intervention du ruisseau Walbridge (source : Michaud et coll., 2004).

2.2.2 Bilan agronomique

Les bilans agronomiques des exploitations agricoles localisées dans les bassins Témoin et Intervention ont été coordonnés par les conseillers en agroenvironnement du Dura-Club, de concert avec les propriétaires. Les données compilées en période de référence et en période d'évaluation (Tableau 9) mettent en relief des utilisations du sol similaires pour les deux bassins versants, qui sont demeurées relativement stables au cours des deux périodes à l'étude. Les cultures annuelles couvrent plus de la moitié des superficies totales des bassins à l'étude, alors que les boisés occupent environ le tiers du territoire. Les bassins se distinguent cependant au plan de leurs bilans des apports en nutriments de même qu'à celui des superficies en culture profitant d'engrais de ferme. Le bassin versant Intervention présente en effet un bilan nettement plus élevé des apports en P, tributaire d'un pourcentage élevé des superficies amendées aux engrais de ferme. On dénote par ailleurs que chacun des bassins a connu une baisse des superficies d'épandage de même que de son bilan d'apport en P en période d'évaluation (2004-2006), comparativement à la période de référence (2001-2003).

En ce qui a trait aux pratiques culturales, notons que plus du tiers des superficies en cultures annuelles du bassin Intervention bénéficiaient de semis direct en période de référence. De plus, chacun des bassins versants a vu ses superficies sous pratiques culturales anti-érosives augmenter en période d'évaluation. Cependant, l'augmentation demeure relativement plus importante dans le bassin Témoin, dont les superficies en semis direct ont doublé en période d'évaluation, pour atteindre une proportion équivalente (36 %) à celle du bassin Intervention (37%).

Tableau 9. Bilan agronomique des bassins versants expérimentaux du ruisseau Walbridge pour les périodes de référence et d'évaluation.

	Période de référence		Période d'évaluation	
	Témoin	Intervention	Témoin	Intervention
Utilisation du sol				
Superficie total du bassin (hectares)	794	631	794	631
Cultures annuelles (%)	49%	53%	52%	54%
Cultures pérennes (%)	14%	8%	11%	6%
Boisé (%)	28%	32%	28%	32%
Autres (%)	9%	7%	9%	7%
Épandage d'engrais de ferme				
Superficie en culture recevant des engrais de ferme (%)	46%	81%	21%	66%
Engrais de ferme appliquée durant la période de croissance des plantes (%)	53%	54%	77%	96%
Bilan agronomique				
Bilan agronomique annuel de l'azote (kg-N / ha en culture) ¹	-15	-16	-26	-16
Bilan annuel d'apport de phosphore à la surface du sol (kg P / ha en culture) ²	12	27	-1	11
Pratique culturale (cultures annuelles)				
Labour à l'automne	74%	60%	56%	45%
Herse à disque à l'automne				
Chisel à l'automne	10%	4%	14%	18%
Chisel au printemps				47%
Aucun travail à l'automne (semis direct)	16%	36%	30%	37%

2.2.3 Bilan hydrique

Les hauteurs de précipitations et de lames d'eau exportées aux exutoires des bassins expérimentaux du ruisseau Walbridge pour les périodes de référence et d'évaluation sont rapportées au tableau 10. Ces observations mettent en relief quelques gradients spatio-temporels au plan hydrologique. Notons d'abord que le bassin versant Témoin présente au cours des deux périodes d'étude des hauteurs d'eau exportées plus élevées que celles mesurées au bassin versant Intervention. Les différences se situent à 45 mm/an et 68 mm/an pour les périodes de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006), respectivement. Ces différences sont attribuées à la position relativement plus basse occupée par le bassin Témoin dans le relief du bassin versant, comparativement au bassin Intervention. La position occupée par le bassin Témoin dans le relief d'ensemble du bassin versant du ruisseau Walbridge y favoriserait ainsi la résurgence de l'aquifère peu profond vers le ruisseau.

Chacun des bassins versants voit sa lame d'eau exportée augmenter en période d'évaluation, comparativement à la période de référence. Sur une base annuelle, ces augmentations sont de l'ordre de 9 % pour le bassin Témoin (de 541 à 590 mm) et de 5 % pour le bassin Intervention (de 496 à 519 mm). Ces augmentations reflètent les hauteurs

de précipitations relativement plus élevées au cours de la période d'évaluation (1155 mm comparativement à 978 mm sur une base annuelle en période de référence). Une augmentation relativement plus importante dans le bassin Témoin tient en grande partie aux hauteurs d'eau exportées en période hivernale au cours de la période d'évaluation (moyenne de 3,45 mm/jr). Une réponse hydrologique relativement plus hâtive et abondante au bassin Témoin serait tributaire de sa position moins élevée dans le paysage du ruisseau Walbridge, favorisant les transferts depuis l'aquifère peu profond.

Tableau 10. Durée et hauteurs des lames d'eau exportées correspondant aux strates retenues pour le calcul des flux aux bassins Témoin et Intervention du ruisseau Walbridge.

BASSIN TÉMOIN

Stratifications								
Ident. No.	Débit (mm jr ⁻¹)	Saison (mois/jour)	Période de référence			Période d'évaluation		
			Jours	Lame d'eau exportée		Jours	Lame d'eau exportée	
1	< 1		322	117 mm	0,36 mm/jour	459	178 mm	0,39 mm/jour
2	> 1	05/01 - 12/01	103	330 mm	3,20 mm/jour	163	571 mm	3,50 mm/jour
3	> 1	12/01 - 05/01	142	395 mm	2,78 mm/jour	140	482 mm	3,45 mm/jour
Global			567	843 mm	541 mm/an	762	1 232 mm	590 mm/an

BASSIN INTERVENTION

Stratifications								
Ident. No.	Débit (mm jr ⁻¹)	Saison (mois/jour)	Période de référence			Période d'évaluation		
			Jours	Lame d'eau exportée		Jours	Lame d'eau exportée	
1	< 1		350	122 mm	0,35 mm/jour	471	182 mm	0,39 mm/jour
2	> 1	05/01 - 12/01	93	273 mm	2,93 mm/jour	152	469 mm	3,09 mm/jour
3	> 1	12/01 - 05/01	124	377 mm	3,04 mm/jour	139	434 mm	3,12 mm/jour
Global			567	772 mm	496 mm/an	762	1 086 mm	522 mm/an

Le tableau 11 rapportent les résultats de la segmentation des hydrogrammes en composantes de surface et souterraine sur la base des signaux géochimiques captés par les sondes multi-paramètres aux exutoires des bassins Intervention et Témoin du ruisseau Walbridge pour la période d'évaluation. Les hydrogrammes segmentés des deux bassins versants (figure 14), de même que leurs charges journalières de sédiments sont reproduits en annexe V. Dans l'ensemble, les séparations de la trentaine d'hydrogrammes à l'étude entre décembre 2004 et novembre 2006 mettent en relief une proportion légèrement plus importante de la lame d'eau annuelle exportée dans le ruissellement de surface au bassin Intervention (31 %) qu'au bassin Témoin (26 %). Cependant, compte tenu de la lame d'eau exportée relativement plus élevée dans le bassin Témoin, les hauteurs de ruissellement de surface estimées sur une base annuelle s'équivalent dans les deux bassins expérimentaux, à 10 mm près. En principe, la position plus basse occupée par le bassin Témoin devrait favoriser le maintien d'une nappe plus près de la surface du sol, et une production relativement plus importante de ruissellement de surface. Une explication plausible aux hauteurs d'eau ruisselées similaires tiendrait plutôt au relief plus ondulé du bassin versant Intervention. Ce dernier aurait favorisé les transferts de surface en réponse

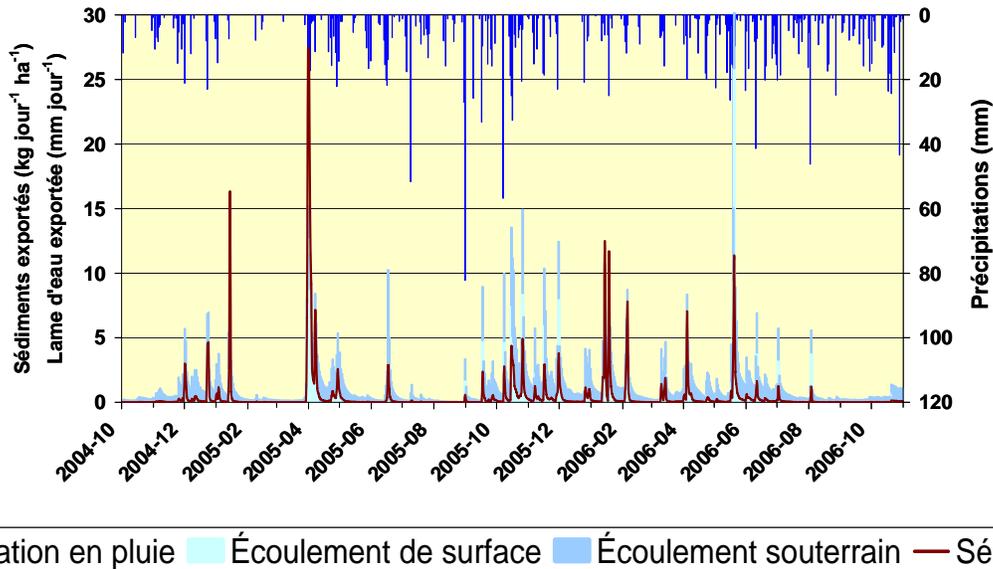
aux précipitations particulièrement intenses de la période d'évaluation 2004-2006. Ainsi, la hauteur d'eau annuelle plus importante évacuée à l'exutoire du bassin Témoin, comparativement au bassin Intervention, serait essentiellement tributaire d'apports sub-surface plus importants.

Tableau 11. Précipitations et hauteurs d'eau exportées totales et associées aux transferts souterrains aux exutoires des bassins versants Walbridge Témoin et Intervention.

Saison	Bassin Intervention			Bassin Témoin	
	Précipitation et fonte de neige	Hauteur d'eau totale à l'exutoire	Proportion souterraine	Hauteur d'eau totale	Proportion souterraine
	(mm)	(mm)		(mm)	
Décembre 2004 à avril 2005	379	261	0,60	257	0,57
Mai à novembre 2005	860	322	0,73	360	0,79
Décembre 2005 à avril 2006	284	335	0,74	371	0,82
Mai 2006 à octobre 2006	885	224	0,68	293	0,72
Total	2408	1142	0,69	1281	0,74

Les hydrogrammes respectifs des bassins Témoin et Intervention (figure 14) mettent par ailleurs en relief l'importante saisonnalité dans la distribution des événements hydrologiques à forte composante de ruissellement de surface. Les crues associées au dégel printanier de 2005 génèrent par exemple un ruissellement de surface plus abondant (111 et 104 mm pour les bassins Témoin et Intervention, respectivement) que celui associé aux précipitations d'intensité exceptionnelle associées à l'ouragan Katrina au cours de l'automne de la même année dans les deux bassins versants (88 et 77 mm pour les bassins Témoin et Intervention, respectivement). La crue hâtive printanière de 2006 s'avère moins intense que celle de 2005. Les pluies de la fin du mois de mai génèrent cependant des hauteurs d'eau journalières qui atteignent des sommets de plus de 30 mm aux exutoires des deux bassins versants le 20 mai 2006. La hauteur d'eau ruisselée au bassin Témoin cumule ainsi 83 mm pour la saison de production, devançant la hauteur ruisselée au bassin Intervention, estimée à 71 mm pour la même période.

Walbridge Intervention



Walbridge Témoin

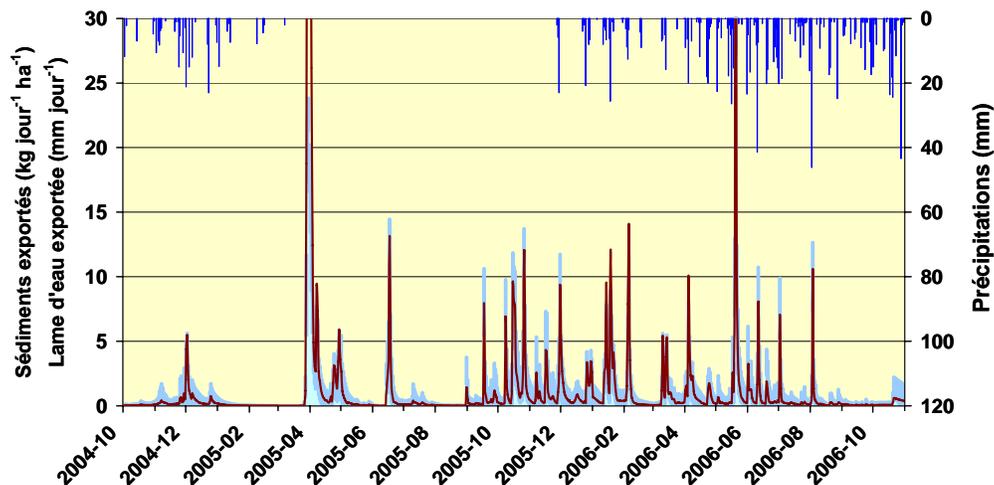


Figure 14. Hydrogrammes segmentés respectifs des bassins Témoin et Intervention pour la période d'évaluation (2004-2006).

2.2.4 Flux de sédiments et nutriments

L'ensemble des résultats de la modélisation des flux de MES, de phosphore (total, biodisponible, total en solution et biodisponible), d'azote (nitrates et ammoniacal) et de calcium pour chacune des strates de débit du ruisseau (base vs crue) et de saison (production vs hiver) sont rapportés en annexe V pour chacun des bassins versants (Témoin et Intervention) et les deux périodes à l'étude (référence et évaluation). Le

tableau 12 met pour sa part en relief les différences dans les concentrations moyennes pondérées pour le débit et les charges exportées de matières en suspension et de nutriments aux exutoires des bassins versants Walbridge, Intervention et Témoin, pour l'ensemble des périodes de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).

Tableau 12. Concentrations moyennes pondérées pour le débit et charges exportées de matières en suspension et de nutriments aux exutoires des bassins versants expérimentaux Walbridge, Intervention et Témoin, pour la période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).

Paramètre de qualité de l'eau	Bassin Intervention						Bassin Témoin					
	Période de référence			Période d'évaluation			Période de référence			Période d'évaluation		
	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹
Matières en suspension	141 133	28 985	0,34	220 325	32 184	0,17	420 737	62 900	0,21	555 500	56 820	0,19
Phosphore total	667	137	0,19	888	130	0,15	1 055	158	0,13	1 562	160	0,14
Phosphore biodisponible	370	76	0,17	531	78	0,15	533	80	0,20	865	89	0,15
Phosphore total dissous	277	57	0,16	470	69	0,20	264	40	0,17	442	45	0,23
Phosphore réactif dissous	243	50	0,18	418	61	0,26	237	35	0,21	364	37	0,27
Azote ammoniacal	574	118	0,22	1 235	180	0,22	721	108	0,13	2 585	264	0,33
Nitrates	38 754	7 959	0,06	43 502	6 354	0,17	39 989	5 978	0,06	40 629	4 156	0,10
Calcium	389 002	79 891	0,04	473 974	69 235	0,04	485 494	72 581	0,05	577 731	59 094	0,04
Hauteur d'eau exportée	772 mm			1 086 mm			843 mm			1 232 mm		
Durée du monitoring	567 jours			762 jours			567 jours			762 jours		

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

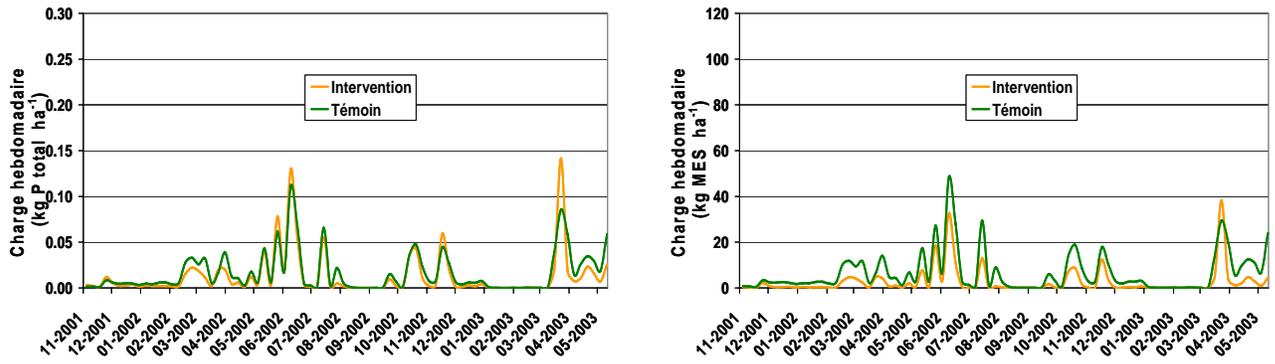
Globalement, les modèles de flux générés sur la base de régressions concentration/débit démontrent un bon ajustement statistique pour le phosphore total et biodisponible, les nitrates et le calcium ($CV < 0,20$). Les estimations de charges pour les MES au bassin Intervention en période de référence ($CV = 0,33$) doivent cependant être interprétées avec précaution. Il en est de même pour les formes solubles de P ($0,16 < CV < 0,27$) et l'ammoniac ($0,13 < CV < 0,33$) pour les deux périodes de référence. Des estimations de charges plus élevées en période d'évaluation pour l'ensemble des paramètres (Tableau 12) témoignent d'une période de suivi plus longue en période d'évaluation (762 jours, contre 567 en période de référence) et conséquemment d'une lame d'eau exportée plus importante. Exprimées sur une base annuelle et spécifique, les charges de sédiments des bassins versants Témoin et Intervention se situent respectivement à 341 et 144 kg/ha-an en période de référence. Ces derniers passent respectivement à 335 (Témoin) et 167 kg/ha-an (Intervention) en période d'évaluation. Des flux de MES relativement plus élevés dans le bassin Témoin sont à la fois tributaires de lames d'eau plus importantes à l'exutoire de ce bassin de même que de concentrations deux fois plus élevées de sédiments charriés dans l'eau de surface. Ces observations témoignent de processus érosifs relativement plus actifs dans ce bassin. L'instabilité des berges observée dans le secteur aval du bassin Témoin contribuerait particulièrement à ce phénomène.

Un gradient spatial dans les charges de P total exportées favorise aussi le bassin Témoin, où les charges annuelles sont estimées entre 0,85 et 0,94 kg P/ha au cours des périodes de référence et d'évaluation, respectivement. Au bassin Intervention, la charge annuelle demeure stable à 0,67 kg P/ha au cours des deux périodes à l'étude. Contrairement au paramètre MES cependant, la différence dans les charges exportées traduit

essentiellement les hauteurs d'eau exportées aux exutoires des bassins. En effet, les concentrations moyennes en P total pondérées pour le débit, se situant entre 130 et 160 mg/l, diffèrent peu entre les périodes et les bassins.

En parallèle à l'estimation de charges de P total relativement plus importantes à l'exutoire du bassin Témoin pour les deux périodes à l'étude, l'analyse des pentes de régression liant les concentrations en P total aux débits des ruisseaux témoignent de dynamiques différentes au plan de la mobilité du P. Les pentes de régression demeurent en effet systématiquement plus élevées au bassin Intervention que celles associées au bassin Témoin, et ce quel que soit la période ou la saison à l'étude (annexe V). Le relief plus accidenté du bassin Intervention expliquerait ce gradient, en favorisant des concentrations élevées lors des évènements hydrologiques comportant une forte composante de ruissellement de surface. Le bassin Témoin témoigne cependant d'ordonnées à l'origine significativement plus élevées que dans le bassin Témoin dans le modèle de régression. Cette sensibilité relativement plus élevée du bassin Témoin à exporter du P, en réponse à l'activité hydrologique du ruisseau, traduit pour sa part une position plus basse dans le relief d'ensemble du bassin versant. Cette dernière favorise d'une part des transferts subsurfaces plus importants, tel que mis en relief précédemment, mais aussi une remise en suspension de P stocké dans le réseau hydrographique. Il est en effet estimé que la position relativement basse du bassin et la morphologie du tronçon principal du cours d'eau du bassin Témoin favorise l'accumulation de sédiments dans le lit du ruisseau. Des charges de MES de trois à dix fois plus élevées dans le bassin Témoin (annexe V) en régime d'écoulement de base, favorise la thèse d'une remise en suspension de P particulière lié aux sédiments stockés dans le réseau hydrographique. A l'opposé, le relief plus incliné du lit du tronçon principal du cours d'eau (0,53 % de pente moyenne) au bassin Intervention ne favorise pas un tel processus de rétention.

Période de référence 2001-2003



Période d'évaluation 2005-2006

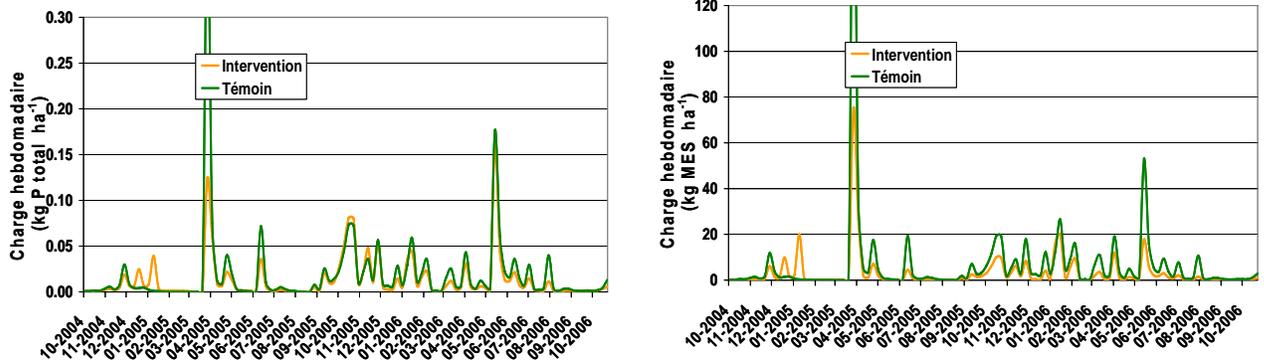


Figure 15. Flux hebdomadaires de matières en suspension et de phosphore total estimés pour les bassins versants Intervention et Témoin du ruisseau Walbridge en période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).

L'analyse des régressions concentration/débits met par ailleurs en relief une saisonnalité dans les concentrations de P total aux exutoires des deux bassins versants. Les concentrations en P total demeurent en effet significativement plus élevées en saison de production qu'en hiver, pour des débits instantanés semblables. Cette différence est attribuée à la saisonnalité des apports en engrais de ferme et minéraux, de même qu'à l'activité biologique accrue dans les sols en saison de production. L'influence de la saison demeure cependant significativement plus élevée dans le bassin Intervention que dans le bassin Témoin. Le bilan des apports en P deux fois plus élevé dans le bassin Intervention expliquerait cette saisonnalité plus marquée des transferts de P.

Bien que présentant des utilisations du sol similaires, les bassins Walbridge témoignent donc de réponses significativement différentes de leur qualité de l'eau à aux conditions hydrologiques. Ces signatures distinctes des ruisseaux sont avantageusement décrites et comparées au moyen de régressions concentration/débit, qui reflètent à la fois les particularités géophysiques des bassins versants de même que leurs bilans respectifs d'apport en phosphore. Ce constat est porteur d'intéressantes implications au plan opérationnel. D'une part, ces résultats démontrent que l'utilisation du sol et le bilan des apports ne suffit pas, à eux seuls, à traduire la vulnérabilité du territoire agricole aux

exportations diffuses de phosphore. À l'instar des autres bassins du réseau d'étude, les propriétés du paysage jouent ici un rôle déterminant dans la mobilité du P. D'autre part, ces résultats militent pour la prise en compte du régime hydrique (données hydrométriques) dans l'interprétation des données de qualité de l'eau. L'analyse de covariance des paramètres de qualité de l'eau, utilisant le débit en covariable, permet ainsi de distinguer les bassins versants et d'interpréter l'influence du paysage et de la régie du parcellaire sur la qualité de l'eau.

L'étude des différentes fractions du P exporté met par ailleurs en relief des spéciations contrastées entre les bassins. Globalement, le phosphore exporté à l'exutoire du bassin Intervention présente une biodisponibilité légèrement plus élevée (56 % et 60 % respectivement en périodes de référence et d'évaluation) qu'au bassin Témoin (51 % et 55 % respectivement en périodes de référence et d'évaluation). Les charges de P au bassin Témoin sont cependant associées à une forte composante particulaire qui compte pour 72 à 75 % du P total exporté selon la période d'étude. La proportion du P total sous une forme particulaire est beaucoup moins élevée au bassin Intervention, soit dans l'ordre de 47 à 58 %. Il est estimé qu'un bilan d'apport en P près de deux fois plus élevé dans le bassin Intervention (29 kg P/ha-an), conjugué à un taux d'érosion moins élevé, y ont favorisé les formes solubles et réactives de P. Pour les deux bassins versants, les richesses en P total des sédiments sont similaires, soit dans l'ordre de 1 900 à 2 000 mg/kg. Ces teneurs témoignent d'un enrichissement en P des sédiments de l'ordre de deux à trois fois plus élevé que celui généralement rapporté pour la couche arable des sols de la région à l'étude (Michaud et coll., 2008a). Notons cependant que la biodisponibilité du P particulaire exporté à l'exutoire du bassin Témoin (34 à 38 % du P particulaire) demeure relativement plus importante qu'au bassin Intervention (14 à 24 %). Ce gradient spatial surprend a priori, dans la mesure où il est contraire au bilan des apports en P dans les bassins. Des facteurs hydrodynamiques, plutôt que le bilan de masse des apports, expliqueraient cette biodisponibilité plus élevée du P particulaire au bassin Témoin. L'importance de la charge de sédiments, couplée à la dynamique de rétention, auraient en effet favorisé le temps de contact et l'interaction des formes solubles de P avec les sédiments stockés dans le réseau hydrographique du bassin Témoin.

Les résultats de la modélisation des flux mettent par ailleurs en relief une saisonnalité dans la spéciation des formes de P observées aux exutoires des bassins versants. Les formes biodisponibles et solubles sont ainsi avantagées en saison de production. Ce gradient saisonnier est particulièrement éloquent pour le bassin Intervention en période d'évaluation (figure 16). On remarque que les pics hivernaux de flux de phosphore comprennent une fraction relativement plus importante de P particulaire non biodisponible. Ce phosphore de nature moins réactive est typiquement associé aux sédiments érodés en provenance des berges et lits des fossés et cours d'eau. En saison de production, l'apport récent de P sous la forme d'engrais de ferme et minéraux, couplé à l'activité biologique favorable à la mobilité du P, favorise l'exportation de formes solubles et réactives de P. Ces dernières ont malheureusement un impact plus important sur le milieu aquatique que les formes moins disponibles, au cours d'une période où le plan d'eau est particulièrement vulnérable aux apports de P assimilable.

Dans l'ensemble, ces observations mettent en relief une importante variabilité dans la spéciation du phosphore exporté aux exutoires des bassins versants. Les fractions solubles, particulaires et biodisponibles sont notamment influencées par la morphologie des bassins et du réseau hydrographique, de même que par la saisonnalité des apports. Au plan opérationnel, cette variabilité milite pour retenir le phosphore biodisponible, qui intègre les formes réactives solubles et particulaires, comme indicateur de pression environnementale, de même que dans l'établissement de charges-cibles de P.

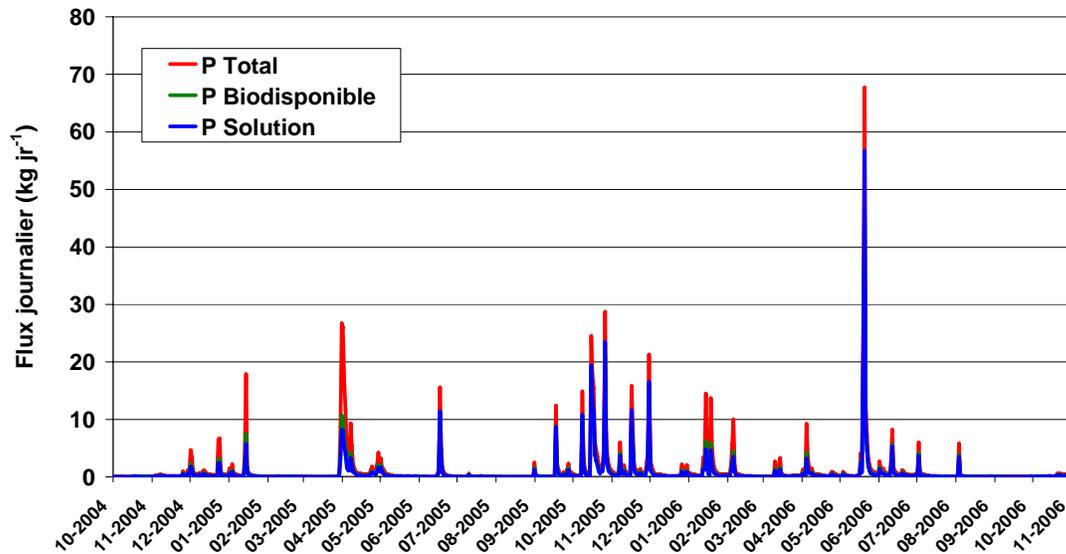


Figure 16. Flux journaliers de phosphore total, biodisponible et en solution à l'exutoire du bassin versant Intervention du ruisseau Walbridge en période d'évaluation (2004-2006).

En ce qui a trait aux concentrations observées de calcium aux exutoires des bassins, on dénote que le bassin Intervention témoigne d'une concentration moyenne pondérée plus élevée (80 mg/l) que le bassin Témoin (60 mg/l). Cette différence traduit vraisemblablement la dominance calcaire du sous-sol du bassin Intervention. Chaque bassin témoigne par ailleurs d'une baisse significative de leurs concentrations en Ca au cours de la période d'évaluation. La baisse observée dans les concentrations est particulièrement importante dans la strate de débits de crue en saison hivernale (annexe V). Au bassin Intervention, la concentration moyenne pondérée pour cette strate de débits passe de 75 mg/l en période de référence à 60 mg/l en période d'évaluation. Pour les mêmes périodes au bassin Témoin, les concentrations passent respectivement de 70 mg/l à 51 mg/l. Ce gradient témoigne des conditions hydrologiques hivernales contrastées entre les deux périodes d'étude. Les crues du printemps 2005 et les redoux de 2006 ont largement contribué à cet écart dans les hauteurs d'eau exportées. Des concentrations en Ca plus élevées en période de référence indiquent des contributions relativement plus importantes des écoulements subsurfaces, comparativement à la période de référence. Ces observations confirment le statut du calcium comme traceur des cheminements hydrologiques dans les bassins versants agricoles. Dans le territoire à l'étude, la nature calcaire du sous-sol de même que l'importance des superficies en culture (profitant de chaulage) favorisent particulièrement le pouvoir explicatif des concentrations en calcium.

Les concentrations et charges de nitrates témoignent de gradients spatial et temporel similaires au calcium. Bien que les charges demeurent sensiblement les mêmes entre les périodes de référence et d'évaluation, les concentrations annuelles démontrent une baisse sensible aux exutoires des deux bassins (tableau 12) en période d'évaluation, reflétant des conditions hydrologiques plus favorables au ruissellement de surface. Au bassin Intervention, la concentration annuelle pondérée pour le débit passe ainsi de 8,0 à 6,3 mg N/l entre la période de référence et la période d'évaluation. Au cours des mêmes périodes, la concentration au bassin Témoin passe de 6,0 à 4,1 mg/l. Rappelons ici que très peu de nitrates transitent par le ruissellement de surface, alors que l'essentiel de la charge est généralement associée aux migrations souterraines. De façon similaire aux tendances observées pour le Calcium, la baisse de la concentration en nitrates en période d'évaluation est particulièrement redevable à la strate de crue hivernale. Les concentrations moyennes pondérées en nitrates pour cette strate de débit sont alors de 4,5 mg/l et de 2,8 g/l respectivement pour les bassins Intervention et Témoin (annexe V).

La baisse relativement plus importante de la concentration en nitrates en période d'évaluation au bassin Témoin reflète par ailleurs le gradient dans les bilans agronomiques annuels de l'azote (tableau 9) des deux bassins à l'étude. Alors que ce dernier est stable au cours des deux périodes au bassin Intervention (-16 kg N/ha), le bilan est considérablement réduit au bassin Témoin en période d'évaluation (-26 kg N/ha). De la même façon, la charge de nitrates exportée augmente en période d'évaluation au bassin Intervention (de 39 à 44 T-N/an), alors qu'elle demeure stable à 40-41 T-N/an au bassin Témoin au cours des deux périodes. Ces observations indiquent que les exportations d'azote vers l'écosystème aquatique demeurent relativement plus sensibles au bilan des apports terrestres, que ne l'est le phosphore. Rappelons en effet que le gradient dans les charges estimées en P aux exutoires des bassins est à l'inverse des bilans respectifs des apports en phosphore. Cette observation reflète le constat généralement exprimé de l'emprise de l'activité hydrologique de surface sur la variabilité spatiale des exportations de P. À l'inverse, la migration de nitrates est moins sensible à l'activité hydrologique de surface, et reflète plutôt le patron spatial du bilan des apports.

2.2.5 Réponse de la qualité de l'eau à l'action concertée

Le tableau 13 résume les résultats de l'analyse de covariance des paramètres MES, P total, P biodisponible, P en solution et Ca associés au bassin Intervention, utilisant les observations au bassin Témoin en covariable. Globalement, les valeurs « F » très élevées associées aux covariables des modèles ANCOVA témoignent des fortes corrélations entre les observations colligées de façon synchrone aux exutoires des bassins jumeaux. Conceptuellement, cette forte corrélation exprime que les deux bassins jumeaux étaient généralement en phase dans la réponse de leur qualité de l'eau aux fluctuations de l'activité hydrologique. Cette prise en compte de la covariable dans le modèle statistique permet en quelque sorte d'extraire la variabilité des différents paramètres de qualité de l'eau associée aux fortes fluctuations de l'activité hydrologique, et ainsi cerner les influences de l'action concertée (effet période) en fonction de la saison (effet saison).

Tableau 13. Valeurs F et probabilités associées aux effets et interactions du modèle d'analyse de covariance appliquées aux observations de qualité de l'eau de la strate de débits de crue (débit journalier > 1,4 mm/jour) du bassin Walbridge Intervention utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.

		Effets et interactions du modèle ANCOVA (N=185 à 195)					
Paramètre	Valeur F Prob >F	PERIODE	SAISON	PERIODE TÉMOIN	TÉMOIN*	TÉMOIN*	TÉMOIN*
				(Covariable)	PÉRIODE	SAISON	PÉRIODE *SAISON
	Valeur F	0,10	0,18	0,02	228,99		
MES	Pr > F	0,7574	0,6740	0,8950	<,0001		
	Valeur F	3,47	11,21	0,09	457,95	4,53	
PTOT	Pr > F	0,0638	0,0010	0,7701	<,0001	0,0345	
	Valeur F	2,62	11,67	1,58	346,84	5,55	
Pbio	Pr > F	0,1070	0,0008	0,2105	<,0001	0,0195	
	Valeur F	0,05	0,08	8,43	195,35	1,06	0,06
Psoln	Pr > F	0,8177	0,7825	0,0041	<,0001	0,3044	0,8140
	Valeur F	11,70	0,00	5,55	558,69	8,97	0,07
Ca	Pr > F	0,0008	0,9684	0,0195	<,0001	0,0031	0,7968
							0,0297

Dans l'ensemble, les résultats indiquent que l'effet Période, découlant des actions agroenvironnementales investies dans le bassin Intervention, n'est pas significatif pour les matières en suspension. L'effet période est cependant significatif sur tous les paramètres associés au phosphore, de même qu'au calcium. L'effet de la période pour les paramètres phosphore en solution et calcium (aussi en solution) est cependant tributaire de la saison (interaction significative Covariable X Saison). Enfin, tous les paramètres témoignent d'interaction entre la covariable et la période (pentes de régression différentes entre les périodes). Conceptuellement, ces interactions indiquent que l'influence sur la qualité de l'eau des changements apportés dans l'aménagement ou la régie du parcellaire des bassins expérimentaux n'est pas indépendante des conditions hydrologiques. Les effets de la période sont détectés de façon significative, et avec de plus fortes amplitudes, pour des conditions de forte activité hydrologique, alors que les concentrations de P dans les ruisseaux sont les plus élevées, ou que les teneurs en Ca y sont les plus faibles.

L'absence de différence significative dans les concentrations en MES entre les périodes de référence et d'évaluation peut être attribuée à plusieurs facteurs. D'une part, rappelons que le bassin Walbridge Intervention ne témoignait pas de foyers d'érosion en rive très sévères, comparativement aux autres bassins Intervention du réseau, comme en font foi des concentrations moyennes pondérées relativement faibles, voisinant les 30 mg/l. Aussi, le bassin versant a fait l'objet de peu d'interventions à l'égard de la stabilisation des rives de cours d'eau, comparativement à un aménagement systématique dans les bassins La Guerre et Fourchette. Les interventions hydro-agricoles dans le Walbridge se sont principalement centrées sur l'amélioration de l'égouttement dans quelques secteurs circonscrits du bassin versant. D'autre part, le bassin Témoin a connu une augmentation sensible de ses superficies en culture sur résidus, passant de 26 à 44 % de la superficie en cultures annuelles sans labour entre les périodes de référence et d'évaluation. Au cours de la même période, la proportion des cultures annuelles sans labour est passée de 44 à 55 % au bassin Intervention. Une vulnérabilité relativement faible du bassin Intervention aux processus d'érosion hydrique, couplée à une augmentation relativement plus importante de la culture sur résidus dans le bassin Témoin en période d'évaluation contribueraient

ainsi à expliquer une absence de réponse de la concentration en sédiments des eaux du bassin Intervention aux actions concertées en aménagement hydro-agricole.

En ce qui a trait au phosphore, les résultats de l'analyse de covariance permettent de détecter une réponse de la qualité de l'eau en période d'évaluation au bassin Témoin. Les résultats de l'ANCOVA appliquée aux concentrations en phosphore total observées à l'exutoire du bassin Intervention, utilisant les concentrations du bassin Témoin comme covariable, ont été présentés précédemment en section Méthodologie (figure 6). Compte tenu de la variabilité des concentrations en P en fonction de la saison, l'effet de cette dernière a été retenu dans le modèle final d'analyse de covariance. Bien que les concentrations en P demeurent relativement plus élevées en saison de production (mai à octobre) qu'en saison hivernale (novembre à avril), l'influence de la période (référence vs évaluation) y est similaire. Toutefois, la réduction détectée dans les concentrations du bassin Intervention n'est pas indépendante des conditions hydrologiques, comme en font foi des pentes significativement différentes pour les périodes de référence et d'évaluation. L'analyse des résultats indique en effet que les différences significatives ($p < 0,05$) dans la qualité de l'eau ne sont détectées qu'à partir d'un seuil de $200 \mu\text{g P/L}$ observé à l'exutoire du bassin Témoin. À titre d'exemple, le modèle ANCOVA nous indique qu'à une concentration de référence au bassin Témoin de $214 \mu\text{g P/L}$ (75^{e} percentile), la concentration en P du bassin Intervention était de $170 \mu\text{g P/L}$ en période de référence. Pour la même concentration au bassin Témoin en 2004-2006 (période d'évaluation), la concentration au bassin Intervention passe à $141 \mu\text{g P/L}$, soit une réduction de 17 % ($p < 0,05$). Compte tenu de la pente de la régression, l'effet de la période tend à s'accroître alors que les crues sont plus chargées en phosphore. À $355 \mu\text{g P/L}$ au bassin Témoin par exemple (percentile 90 %), la concentration en P au bassin Intervention passe de $283 \mu\text{g P/L}$ en période de référence à 213 en période d'évaluation, soit une réduction de 25 % ($p < 0,05$). Une réponse significative de la qualité de l'eau à l'aménagement hydro-agricole du bassin, détectable seulement au moment des crues les plus chargées en phosphore et associées à une importante contribution du ruissellement de surface, est cohérente avec la nature des interventions réalisées dans le bassin versant. Celles-ci étaient en effet essentiellement ciblées sur l'amélioration de l'égouttement des portions du parcellaire où une vulnérabilité accrue avait été diagnostiquée.

Les résultats de l'ANCOVA pour les fractions biodisponibles et solubles du P indiquent des réductions plus importantes en période d'évaluation de ces fractions assimilables, que celles associées au P total. La concentration en P biodisponible au bassin Intervention affiche ainsi une réduction significative de 20 % en période d'évaluation, comparativement au bassin Témoin, et ce à partir de la concentration médiane de $55 \mu\text{g P/L}$ au bassin Témoin. L'écart entre les observations de concentrations en P biodisponible entre les bassins en période d'évaluation s'accroît pour les paires d'échantillons prélevés lors des crues les plus chargées en phosphore. Ainsi, les concentrations en P biodisponible au bassin Intervention affichent des réductions de 32 % en période d'évaluation, considérant le 75^{e} percentile des observations au bassin de référence. La réduction est encore plus marquée pour la fraction de P en solution, qui affiche une réduction de 39 % en saison de production, détectée à partir du 50^{e} percentile des observations au bassin Témoin (tableau 14).

Tableau 14. Moyennes (anti-log) ajustées au modèle de covariance des observations de qualité de l'eau de la strate de débits de crue (débit journalier > 1,4 mm/jour) du bassin Walbridge Intervention utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.

Paramètre	Moyennes (anti-log) ajustées Au modèle de covariance (N=185 à 195)				Différences Pour l'effet Période ⁽¹⁾	
	Référence	Référence	Évaluation	Évaluation	Production	Hiver
	Hiver	Production	Hiver	Production		
MES (mg L ⁻¹)	13,52	14,04	14,36	14,89	NS	NS
PTOT (ug L ⁻¹) ^(2,3)	84,85	109,08	79,39	98,04	NS	NS
Pbio (ug L ⁻¹) ⁽³⁾	50,80	60,04	36,89	52,96	-20% **	-20% **
Psoln (ug L ⁻¹) ⁽³⁾	35,53	53,25	32,92	32,44	-39% ***	NS
Ca (mg L ⁻¹) ⁽³⁾	64,22	65,63	68,53	75,27	+15% ***	NS

¹ Exprime la tendance temporelle au bassin intervention, soit la différence des moyennes ajustées au modèle ANCOVA (Période d'évaluation - Période de référence).

Taux de probabilité: ***: P<0.001; **: P<0.01; *: P<0,05

² Différence significative à partir du percentile 75% au bassin Témoin.

³ La différence des moyennes rapportées s'applique à la valeur médiane du paramètre pour le percentile 50% (médiane) au bassin témoin. Puisqu'il y a interaction significative du paramètre avec la période, les pentes des régressions diffèrent entre les périodes.

Dans l'ensemble, la détection d'une réduction relativement plus importante des concentrations des formes biodisponibles et solubles de P versus le P total est cohérente avec la nature des interventions hydro-agricoles et des changements intervenus dans la gestion des engrais de ferme au bassin Intervention. Il est estimé que les interventions hydro-agricoles sur le cours d'eau et le parcellaire du bassin Intervention ont eu un effet tangible sur les principaux problèmes d'égouttement diagnostiqués dans ce bassin versant. La réduction des hauteurs du ruissellement de surface sur ces zones de champ particulièrement vulnérables se serait traduite en atténuation de la charge de P.

Une atténuation relativement plus importante des formes réactives de P traduit une influence sur le P en provenance des champs plutôt que de l'érosion en rive, qui démontre généralement une spéciation à dominance particulière à faible biodisponibilité. Rappelons par ailleurs que le bilan des apports en P a été considérablement diminué en période d'évaluation au bassin Intervention, passant de 27 à 11 kg P/ha-an pour l'ensemble du bassin versant. Au cours de la même période, la proportion des engrais de ferme épandus durant la croissance des plantes y est aussi passée de 54 à 96 %. Des tendances similaires ont aussi été documentées dans la gestion des sources de P au bassin Témoin, mais de moindre amplitude (tableau 16). En bref, il est estimé que la combinaison de l'aménagement des zones les plus hydro-actives du parcellaire et des changements apportés aux quantités et modalités des apports de P ont contribué, conjointement, à la réduction des concentrations en P assimilable lors des crues du ruisseau. Une réponse plus marquée lors des crues du ruisseau les plus intenses milite pour une influence des améliorations apportées à l'égouttement du parcellaire. Une réduction plus importante des formes réactives, de même que la saisonnalité de la réponse

du phosphore en solution, témoignent aussi d'une influence de la gestion des apports de P. Le dispositif expérimental ne permet cependant pas de dissocier les influences respectives des facteurs déterminants des sources et du transport du P.

Au plan opérationnel, il demeure par ailleurs important de chiffrer la réduction globale de la charge de P en période d'évaluation dans le bassin Intervention. Cette estimation est compliquée du fait que la réduction des concentrations en P détectée en période d'évaluation au bassin Intervention (relativement au bassin Témoin), varie en fonction des conditions hydrologiques (figure 5). Une estimation théorique de la réduction globale de la charge de P exportée en période d'évaluation a cependant été obtenue en appliquant les taux variables de réduction dans les concentrations en P estimés par l'ANCOVA aux charges prédites par le modèle d'estimation des flux présentées en section 2.2.4. En appliquant ainsi des taux de réduction des concentrations en P total de l'ordre de 17 % et 25 % respectivement aux 75^e et 90^e percentiles des prédictions journalières de flux de P estimées en période de crue (débit journalier > 1 mm/jr), on obtient une réduction 112 kg pour l'ensemble de la période de référence. Cette réduction théorique correspond à 17 % du flux total exporté au bassin Intervention, estimée initialement à 667 kg P total.

L'analyse en covariance des concentrations en calcium mettent pour leur part en évidence une triple interaction (covariable X saison X période). Une augmentation significative des concentrations en calcium est détectée en période d'évaluation au bassin Intervention, comparativement au bassin Témoin, mais de façon plus marquée en saison de production. Encore ici, cet effet de la période est plus accentué lors des crues les importantes du ruisseau. Au percentile médian de la distribution des concentrations au bassin Témoin, la concentration en Ca au bassin Intervention affiche une augmentation de 15 % en saison de production, sans pour autant afficher d'augmentation significative en hiver. L'augmentation relative en Ca au bassin Intervention grimpe à 31 % pour le 25^e percentile au bassin Témoin en saison de production.

Les augmentations relatives des concentrations en Ca dans les échantillons prélevés lors des fortes crues au bassin Intervention en saison de production sont attribuées à l'influence des aménagements hydro-agricoles sur la répartition des écoulements de surface et sub-surface. Le laminage de la lame de ruissellement de surface dans les zones vulnérables du bassin Intervention, et/ou son transfert partiel vers les voies souterraines, auraient contribué à hausser les concentrations en Ca à l'exutoire du bassin, témoignant de contributions relativement plus importante de l'écoulement sub-surface. En hiver, un léger gradient dans l'augmentation des concentrations en Ca au bassin Intervention est aussi perceptible pour les fortes crues associées au 25^e percentile de la distribution du bassin Témoin (9 % d'augmentation de la concentration en Ca, $p < 0,05$). Compte tenu de la hauteur généralement plus élevée de la nappe d'eau en saison hivernale et printanière, il est présumé que les interventions hydro-agricoles ont une moindre influence sur la répartition surface et subsurface des écoulements qu'en période estivale.

Dans l'ensemble, les tendances détectées dans les concentrations en Ca exprimées par l'ANCOVA supportent la thèse d'une atténuation des pointes de ruissellement de surface attribuable à l'aménagements hydro-agricole du bassin versant. La réponse est d'autant

plus significative en saison de production et pour les crues les plus intenses du ruisseau Walbridge. Ces gradients et interactions détectés pour le Ca sont cohérents avec ceux mis en relief pour les différents paramètres de P. Ils supportent la thèse que la réduction significative des concentrations en phosphore au bassin versant Intervention en période d'évaluation est attribuable en tout ou en partie à l'atténuation de la contribution du ruissellement de surface au bilan hydrique global du bassin versant.

2.3 Rivière La Guerre

La problématique environnementale du bassin versant de la rivière La Guerre est liée à celle du lac St-François. Ce dernier a perdu son caractère naturel depuis la construction des ouvrages de retenue à son embouchure et à sa sortie. Les premiers travaux visant la régularisation de la partie supérieure du fleuve St-Laurent et du lac St-François remontent aux environs de 1845. La construction du canal de Beauharnois en 1932, ainsi que l'aménagement de la centrale hydroélectrique, ont régularisé le niveau des eaux à environ 0,9 mètres plus haut que le niveau moyen à l'état naturel. Plusieurs basses terres le long des rives du lac St-François furent alors inondées, ou affectées par un niveau de la nappe si près de la surface qu'il était impossible d'y pratiquer l'agriculture.

À titre de mesure palliative, le gouvernement fédéral et le gouvernement du Québec ont entrepris en 1933 de dévier les eaux de la rivière La Guerre dans la rivière Saint-Louis. Un barrage a alors été installé à l'embouchure de la rivière La Guerre, de manière à empêcher les eaux du lac St-François d'y entrer. Cette intervention fut à l'origine de graves problèmes dans la portion aval du bassin versant de la rivière Saint-Louis. Peu après 1960, on bloque à toutes fins pratiques l'écoulement de la rivière La Guerre vers la rivière Saint-Louis. En 1974, le ministère de l'Agriculture construit une station de pompage afin d'évacuer les eaux de la rivière La Guerre dans le lac St-François, ce qui règle le problème des terres inondées ou affectées par le niveau d'eau du lac St-François. Le pompage de la rivière accentue cependant les variations dans le niveau d'eau, comparativement à une rivière qui coule naturellement, par gravité. Lors des étiages, aucun pompage ne s'effectue au cours de périodes pouvant s'échelonner sur plusieurs semaines. Pendant ces périodes d'arrêt des pompes, aucune eau turbide n'affecte la clarté de l'eau du lac. Lorsque les pompes se remettent en marche, un panache d'eau trouble se forme dans le Lac Saint-François.

Depuis 1986, plusieurs études ont été réalisées et diverses solutions ont été proposées pour contrer le problème de contamination diffuse du Lac Saint-François à l'embouchure de la rivière La Guerre. Dans la foulée de ces initiatives, le club agroenvironnemental du bassin La Guerre est fondé en 1996. Le regroupement de producteurs est alors l'unique organisation du réseau québécois des 80 clubs agroenvironnementaux constitué en fonction de limites hydrographiques et doté d'une mission ciblée sur la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant. Le club agroenvironnemental du bassin La Guerre regroupe 32 exploitations agricoles, sur un total de 45 fermes qui cultivent des terres dans le bassin versant. Deux agronomes conseillent les membres à l'égard de la transition aux différentes pratiques agroenvironnementales et en effectuent le suivi. Depuis sa création,

le club travaille à l'implantation et à l'amélioration de plusieurs pratiques culturelles, dispense des cours à ses membres, réalise des bilans minéraux, participe à plusieurs projets de recherche à la ferme et organise des visites et journées de démonstration. Ces activités ont pour objectif de soutenir la participation concrète des membres à l'amélioration de la qualité de l'environnement et plus particulièrement à l'amélioration de la qualité de l'eau de la rivière La Guerre. Cet objectif se concrétise plus en amont avec la participation du club en 2001, au « Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles » coordonné par l'IRDA. À partir de 2001, les producteurs agricoles du bassin versant, le club conseil du bassin La Guerre, l'équipe scientifique de l'IRDA et les conseillers agricoles du MAPAQ mettent ainsi à profit leurs diverses compétences pour poser un diagnostic précis de la condition des champs et de la qualité de l'eau des ruisseaux, afin d'intervenir de façon concertée, et sur mesure, pour améliorer l'état des terres et des cours d'eau. À l'instar des bassins du ruisseau Fourchette en Beauce et du ruisseau Walbridge en Montérégie-Est, un des principaux objectifs du réseau de recherche-action à la ferme dans le bassin de la rivière La Guerre est de quantifier l'amélioration de la qualité de l'eau suivant une action concertée des entreprises agricoles dans l'aménagement des terres et l'adoption de pratiques culturelles de conservation. La figure 17 localise les bassins Témoin et Intervention de la rivière La Guerre.

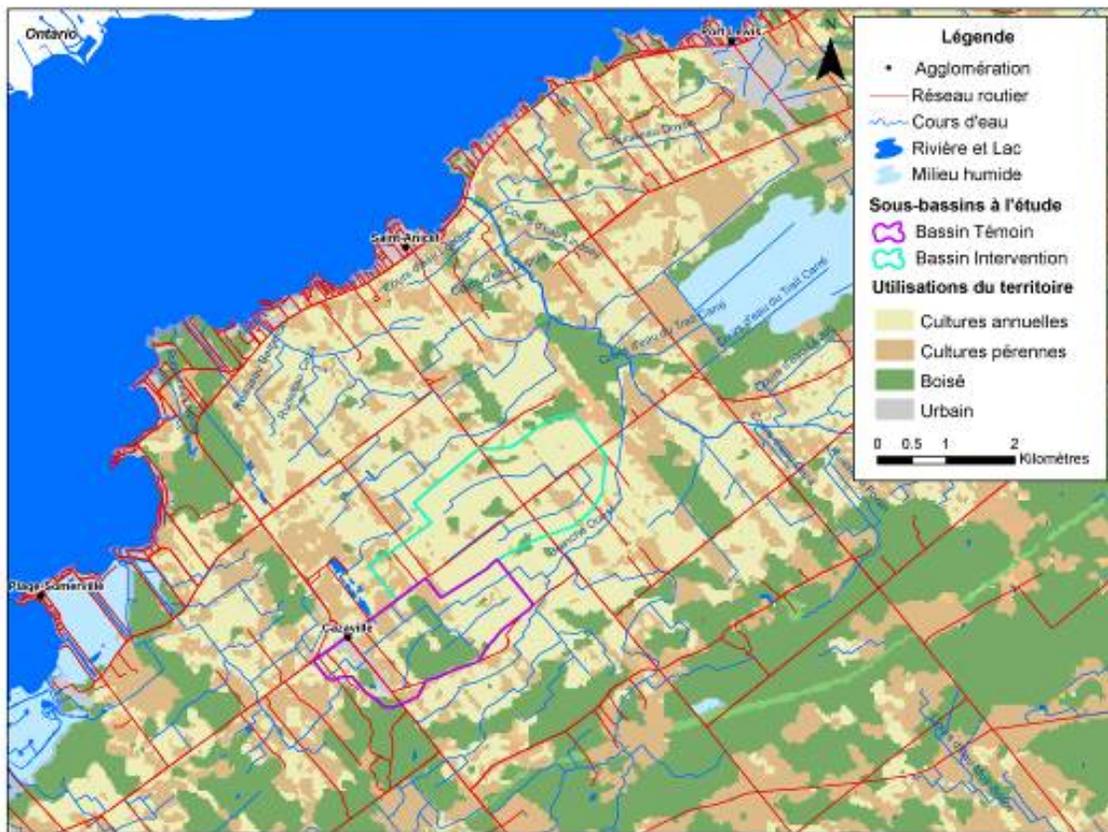


Figure 17. Localisation des bassins Témoin et Intervention du bassin versant de la rivière La Guerre.

2.3.1 Diagnostic et aménagement hydro-agricole

Le diagnostic du bassin Intervention de la rivière La Guerre réalisé au cours de la période de référence (2001-2003) a mis en relief l'instabilité des talus d'une proportion importante des cours d'eau du bassin versant. Compte tenu de la position relativement basse du bassin Intervention dans le paysage, le contrôle artificiel du débit de la rivière était à la source de refoulements épisodiques de son écoulement. La caractérisation de l'état du réseau hydrographique du bassin Intervention, réalisée au printemps 2002, démontre que le maintien du niveau de l'eau artificiellement élevé en période estivale contribue à l'instabilité des pieds de berge et leur sapement en raison de la difficulté pour la végétation de s'y établir. L'abondante accumulation de sédiments constatée dans les branches du ruisseau Intervention, malgré un récurage au milieu des années quatre vingt dix, témoigne aussi de la dynamique d'érosion des rives et de sédimentation à l'œuvre dans le bassin Intervention.

La figure 18 et le tableau 15 décrivent les aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant Intervention de la rivière La Guerre. La branche 16, qui était la plus affectée par le phénomène de refoulement, fut réaménagée en adoucissant les talus (pente 1,5:1) et en stabilisant les rives par des techniques de génie-végétal (plantation d'arbustes dans les talus au 50 cm). De plus, une bande riveraine arbustive fut aménagée le long des rives de ce cours d'eau. La topographie relativement plane du bassin versant, combinée à une faible densité de drainage de surface par des rigoles et des fossés, favorisait par ailleurs la concentration du ruissellement de surface et l'accumulation d'importants volumes d'eau dans les dépressions. L'installation d'avaloirs et l'aménagement de bassins de captage ont permis d'atténuer le transport des sédiments tout en assurant un drainage adéquat de ces secteurs. Aux endroits où le débit est moins important, des perrés ou une stabilisation végétale au moyen de plaques de gazon ont été utilisés pour stabiliser les exutoires et confluences.

Enfin, une bande riveraine arbustive ou arborescente a été aménagée en bordure des fossés municipaux longeant les deux chemins publics traversant le bassin versant. La caractérisation de l'égouttement du bassin avait démontrée que l'absence de risberme ou de végétation en haut de talus contribuait à une forte connectivité entre les champs et le réseau de fossés publics. L'interception du ruissellement de surface avait pour objectif de favoriser son infiltration au champ, de laminier les pointes de crue et de provoquer la sédimentation au champ plutôt que dans le réseau hydrographique. Compte tenu de la forte exposition du secteur aux vents dominants, l'établissement de haies brise-vent a été privilégié par plusieurs propriétaires.

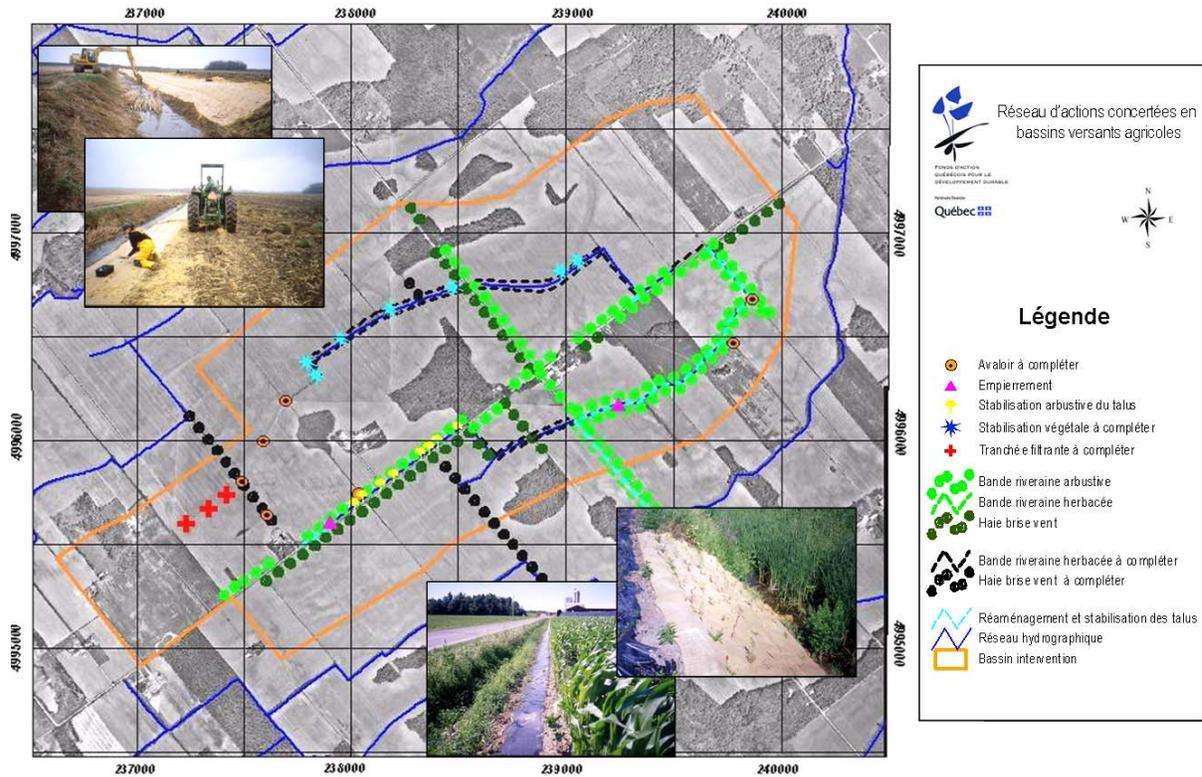


Figure 18. Localisation des aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin Intervention de la rivière La Guerre (Michaud et coll., 2004).

Tableau 15. Aménagements hydro-agricoles réalisés dans le bassin versant Intervention de la rivière La Guerre.

Description des aménagements

Correctifs au talus de cours d'eau

- adoucissement des talus (pente 1,5 / 1)
- avec stabilisation des talus par ensemencement herbacé
- avec stabilisation des talus (biogénie) 1 500 mètres

Fossé reprofilé

- adoucissement des talus 830 mètres
- stabilisation des talus par ensemencement herbacé 640 mètres
- ajustement du fond (pente longitudinale et profondeur)

Bande riveraine arbustive

- plantation d'une rangée d'arbuste le long des rives de cours d'eau. 6 950 mètres
- Essences utilisées : Spirée, rosier, sureau, viorne trilobée, etc...

Bande riveraine arborescente (haie brise-vent)

- plantation d'une rangée d'arbre le long des rives de cours d'eau. 2 810 mètres
- Essences utilisées : Chêne, noyer, érable argenté, argousier etc...

Stabilisation à l'embouchure des rigoles ou dépressions

- déversoir empierré dans le talus à l'embouchure de rigole ou de dépressions. 3 unités

2.3.2 Bilan agronomique

Les bilans agronomiques des exploitations agricoles localisées dans les bassins Témoin et Intervention ont été coordonnés par les conseillers en agroenvironnement du Club conseil du bassin La Guerre, de concert avec les propriétaires. Les données compilées en période de référence et en période d'évaluation (tableau 16) mettent en relief des utilisations du sol distinctes pour les deux bassins versants. Les cultures occupent ainsi 48 % et 87 %, respectivement des superficies totales des bassins Témoin et Intervention. Alors que la proportion des cultures annuelles demeure stable (87 %) au cours des deux périodes à l'étude au bassin Intervention, elle diminue sensiblement au bassin Témoin. Alors que 90 % des superficies cultivées étaient en cultures annuelles en période de référence (2001-2003), cette proportion n'est plus que de 37 % en période d'évaluation (2004-2006).

Sur le plan des apports en éléments nutritifs, l'augmentation des superficies en fourrages pérennes au bassin Témoin se traduit en baisses importantes du bilan agronomique de l'azote et du bilan des apports en phosphore. Au bassin Intervention, le bilan des apports en P demeure stable au cours des deux périodes d'étude, alors que le bilan agronomique de l'azote est réduit sensiblement. Cette amélioration du bilan de l'azote au bassin Intervention est en large partie redevable à la transition aux épandages en post-levée des cultures, alors que 87 % des engrais de ferme était épandu en saison de croissance des cultures durant la période d'évaluation, comparativement à 11 % en période de référence. Mentionnons enfin l'introduction de cultures de couvertures suivant les céréales à paille dans le bassin versant Intervention. Cette pratique agricole de conservation a été appliquée de façon complémentaire aux épandages estivaux d'engrais de ferme, afin d'optimiser la rétention des éléments nutritifs au profit des cultures principales au printemps suivant.

Sur le plan des pratiques culturales, les cultures annuelles demeurent largement labourées au bassin Témoin, dans des proportions respectives de 71 % et 89 % pour les périodes de référence et d'évaluation. Le bassin versant Intervention connaît cependant un important changement dans les pratiques culturales. Globalement, la proportion des superficies labourées passe de 62 % à 35 %, respectivement, de la période de référence à la période d'évaluation. La transition profite largement au semis direct, qui est dorénavant appliqué à plus de la moitié de la superficie en cultures annuelles du bassin versant Intervention. La transition à la culture sur résidus a été facilitée par la mise sur pieds en 2006 d'une Coopérative d'Utilisation de Machineries Agricoles (CUMA) par les membres du club agroenvironnemental. Cette formule d'achat en groupe et de partage de machineries agricoles a notamment permis l'acquisition de semoirs spécifiquement adaptés au semis direct des cultures.

Tableau 16. Bilan agronomique des bassins versants expérimentaux de la rivière La Guerre pour les périodes de référence et d'évaluation.

	Période de référence		Période d'évaluation	
	Témoin	Intervention	Témoin	Intervention
Utilisation du sol				
Superficie total du bassin (hectares)	324	460	324	460
Cultures annuelles (%)	43%	67%	31%	77%
Cultures pérennes (%)	5%	21%	18%	10%
Boisé (%)	25%	5%	25%	5%
Autres (%)	27%	8%	27%	8%
Épandage d'engrais de ferme				
Superficie en culture recevant des engrais de ferme (%)	21%	31%	12%	31%
Engrais de ferme appliquée durant la période de croissance des plantes (%)	27%	11%	100%	87%
Bilan agronomique				
Bilan agronomique annuel de l'azote (kg-N / ha en culture)	-21	-25	-45	-13
Bilan annuel d'apport de phosphore à la surface du sol (kg P / ha en culture)	-3	-4	-13	-5
Pratique culturale (% superficies en cultures annuelles)				
Labour à l'automne	71%	62%	80%	35%
Herse à disque à l'automne	20%		20%	10%
Chisel à l'automne	9%	31%		3%
Chisel au printemps				
Aucun travail à l'automne (semis direct)		6%		51%

2.3.3 Bilan hydrique

Le contrôle artificiel des débits de la rivière La Guerre au moyen du barrage et de la station de pompage à son embouchure a requis une adaptation de la procédure d'estimation des débits des cours d'eau généralement utilisée en écoulement libre. Les visites de terrain en période estivale en début de projet ont tôt fait de démontrer que la gestion artificielle du débit de la rivière La Guerre, pompée à son embouchure dans le Lac Saint-François, occasionnait des refoulements de l'écoulement de la rivière. Le bassin Intervention ciblé pour le projet était particulièrement affecté, ce qui ne permettait pas d'établir une courbe de tarage hauteur-débit stable à son exutoire. L'équipe de l'IRDA a ainsi multiplié les mesures de débits pendant les périodes d'importante activité hydrologique et en période de refoulement aux exutoires des deux bassins versants expérimentaux afin d'adapter et de valider une méthode d'estimation des débits.

La procédure retenue pour l'estimation des débits aux exutoires des bassins expérimentaux repose sur la détection et la prise en compte des refoulements découlant de la gestion des pompages à l'embouchure du cours d'eau principal. Trois sources de données ont ainsi été mises à profit, soit les durées et périodes de pompage colligées auprès des opérateurs de la station à l'exutoire du bassin La Guerre, les données d'élévation limnimétrique en continu (niveaux d'eau), de même que les jaugeages hydrométriques (mesures instantanées du débit au moyen de moulinets hydrologiques) relevés aux exutoires des bassins versants expérimentaux. Dans un premier temps, les

courbes de tarage de référence des ruisseaux ont été réalisées sur la base des jaugeages hydrométriques combinant des observations colligées en conditions d'écoulement libre, en absence de refoulement. Ces courbes de référence, combinées aux données de pompage à l'exutoire, ont permis en second lieu de détecter les périodes de refoulement des ruisseaux. Au cours de ces périodes, les débits jaugés se situaient alors en marge de la courbe de tarage hauteur-débit représentative d'un écoulement libre. Les jaugeages ont mis en relief que le bassin Intervention était plus sujet aux épisodes de refoulement (relation hauteur-débit aléatoire) que le bassin Témoin, en raison de la position plus élevée de ce dernier dans le relief du bassin La Guerre (4 mètres de différence d'élévation aux exutoires).

Trois cas ont alors été considérés dans la procédure d'estimation en continu des débits aux exutoires des bassins Témoin et Intervention. 1) En absence de refoulement aux deux bassins, la courbe de tarage de référence a été appliquée directement dans le calcul des débits. 2) Dans la plupart des cas où un refoulement était constaté, uniquement les débits du bassin Intervention ont dû profiter d'une correction sur la base des observations au bassin Témoin, alors soustrait de l'influence de l'élévation du niveau du cours d'eau principal. Les débits spécifiques (mm/jr) estimés au bassin Témoin ont alors été appliqués au bassin Intervention. 3) En quelques occasions cependant, lors des crues de très forte amplitude, un refoulement a été constaté aux deux bassins versants. Les capacités et durée de pompage à l'exutoire du cours d'eau principal (capacité maximale de 9 m³/s) ont alors été traduites en débits et appliqué uniformément à l'ensemble de la superficie du bassin versant. Lors de ces crues d'intensité exceptionnelle, il est alors estimé que l'ensemble du bassin versant contribue de façon relativement uniforme au débit de la rivière en raison de la saturation généralisée des sols.

Le tableau 17 résume les hauteurs des lames d'eau estimées pour les bassins Témoin et Intervention de la rivière La Guerre au cours des périodes de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006). Les hydrogrammes des deux bassins versants expérimentaux sont par ailleurs reproduits en annexe V. Une stratification a été appliquée aux hauteurs d'eau estimées en fonction de trois strates de débits (< 1 mm/jr; > 1 > 5,5 mm/jr, > 5,5 mm/jr) de façon à optimiser la modélisation des relations entre les paramètres de qualité d'eau et le régime hydrique du cours d'eau. Bien que le report annualisé des hauteurs d'eau rapportée au tableau 17 fait état de hauteurs d'eau relativement moins importantes en période d'évaluation qu'en période de référence pour les deux bassins versants expérimentaux, rappelons ici que la période d'évaluation, relativement plus longue, comprend deux périodes estivales (2005 et 2006), contrairement à la période de référence, qui n'en comprend qu'une seule (2002). L'implantation des aménagements hydro-agricoles au printemps 2003 a effectivement requis l'interruption du monitoring des cours d'eau.

Tableau 17. Durée et hauteurs des lames d'eau exportée correspondant aux strates retenues pour le calcul des flux aux bassins Témoin et Intervention de la rivière La Guerre.

BASSIN TÉMOIN								
Stratifications								
Ident.	Débit	Saison	Période de référence			Période d'évaluation		
No.	(mm jr ⁻¹)	(mois/jour)	Jours	Lame d'eau exportée		Jours	Lame d'eau exportée	
1	< 1		279	68 mm	0,24 mm/jour	279	139 mm	0,50 mm/jour
2	> 1 et < 5,49	05/01 - 12/01	113	336 mm	2,97 mm/jour	179	426 mm	2,38 mm/jour
3	> 1 et < 5,49	12/01 - 05/01	74	182 mm	2,47 mm/jour	115	278 mm	2,42 mm/jour
4	> 5,49	05/01 - 12/01	25	163 mm	6,58 mm/jour	16	111 mm	6,98 mm/jour
5	> 5,49	12/01 - 05/01	29	210 mm	7,19 mm/jour	16	117 mm	7,27 mm/jour
Global			520	958 mm	675 mm/an	605	1 068 mm	644 mm/an

BASSIN INTERVENTION								
Stratifications								
Ident.	Débit	Saison	Période de référence			Période d'évaluation		
No.	(mm jr ⁻¹)	(mois/jour)	Jours	Lame d'eau exportée		Jours	Lame d'eau exportée	
1	< 1		264	57 mm	0,21 mm/jour	351	137 mm	0,39 mm/jour
2	> 1 et < 5,49	05/01 - 12/01	100	254 mm	2,55 mm/jour	122	293 mm	2,40 mm/jour
3	> 1 et < 5,49	12/01 - 05/01	84	174 mm	2,07 mm/jour	92	211 mm	2,30 mm/jour
4	> 5,49	05/01 - 12/01	41	250 mm	6,10 mm/jour	23	174 mm	7,59 mm/jour
5	> 5,49	12/01 - 05/01	31	200 mm	6,44 mm/jour	17	126 mm	7,40 mm/jour
Global			520	935 mm	656 mm/an	605	941 mm	567 mm/an

Globalement, les hauteurs d'eau estimées reflètent les conditions météorologiques contrastées qui ont marqué les périodes de référence et d'évaluation. Les hauteurs d'eau moyennes pour les strates de débit de crue (> 5,5 mm/jr) apparaissent ainsi relativement plus élevées en période d'évaluation qu'en période de référence. Cette intensité de la réponse hydrologique aux bassins versants en période d'évaluation est largement redevable aux précipitations exceptionnellement intenses et abondantes des saisons de production (mai à novembre) 2005 et 2006. Il est par ailleurs noté que l'augmentation de l'intensité des crues en période d'évaluation est relativement plus importante au bassin Intervention qu'au bassin Témoin. Les hauteurs d'eau moyennes pour la strate de crue (> 5,5 mm/jr) croissent ainsi de 1,0 à 1,5 mm/jr au bassin Intervention entre les deux périodes d'étude (Tableau 17). La proportion relativement plus importante des superficies en cultures fourragères pérennes au bassin Témoin en période d'évaluation, comparativement à la période de référence, expliquerait une réponse hydrologique moins intense dans ce bassin versant aux fortes intensités de précipitations de 2005 et 2006.

La comparaison des hydrogrammes des bassins versants entre les deux périodes d'étude (annexe V) met en relief des pics de crue beaucoup plus évasés en période de référence qu'en période d'évaluation. Ces différences dans la forme des hydrogrammes reflètent en partie l'influence des pompages à l'exutoire de la rivière La Guerre. Les débits maintenus relativement élevés (> 8 mm/jr) en juin 2002 reflètent le laminage d'une importante crue consécutive à d'abondantes précipitations et au bris d'équipement à la station de pompage. En période d'évaluation (2005-2006), les hydrogrammes des deux bassins revêtent des formes plus naturelles. Des débits d'étiage succèdent aux pics de crues dans les deux bassins versants. Cette distribution des pics de crue est redevable en partie à la nouvelle stratégie de pompage de la rivière La Guerre mise en place en période

d'évaluation (2004-2006). Celle-ci implique dorénavant des pompages de plus faible intensité, mais effectués de façon plus régulière et généralement de nuit, de façon à minimiser les impacts sur les usages récréatifs des eaux du lac Saint-François.

2.3.4 Flux de sédiments et nutriments

Le contrôle exercé par les conditions hydrologiques sur les concentrations et les flux de sédiments et de nutriments aux bassins expérimentaux du bassin La Guerre diffère des autres bassins versants expérimentaux du réseau d'étude. En effet, ces derniers présentent généralement des réponses bien structurées de la qualité de l'eau aux fluctuations du régime hydrique. Il en résulte des relations linéaires significatives entre le débit et les concentrations de sédiments ou de nutriments en période de crue du ruisseau. Dans le cas des bassins expérimentaux du bassin La Guerre, les pentes de régression concentration:débit apparaissent généralement aléatoires (annexe V). Cette absence de linéarité est attribuée à l'influence des refoulements de l'écoulement de la rivière La Guerre. Les concentrations observées en MES, N, P et Ca sont alors en partie régulées par les processus hydrodynamiques à l'œuvre dans les ruisseaux, alternant sédimentation et remise en suspension du stock de sédiments et des nutriments.

Malgré l'apparente dissociation entre le régime hydrique et la qualité de l'eau, les estimations des flux de sédiments et de nutriments aux exutoires des bassins versants (tableau 18) présentent des coefficients de variation (obtenus par validation croisée) voisinant les 15 %. Cet ajustement des modèles flux:débit demeure acceptable, compte tenu de la faible superficie des bassins à l'étude (Walker, 1998). L'ammoniac fait cependant exception, avec des coefficients de variation compris entre 22 et 34 % pour les quatre combinaisons Bassin X Période. L'ajustement satisfaisant des modèles pour la plupart des paramètres de qualité de l'eau est redevable au grand nombre d'échantillonnages réalisés lors des crues du ruisseau, notamment avec le support des échantillonneurs automatisés en période d'évaluation. La dynamique de refoulement des eaux a par ailleurs contribué à réduire la variabilité dans les concentrations instantanées des paramètres de qualité de l'eau (échantillonnages ponctuels) en fonction du débit des ruisseaux, favorisant du coup l'ajustement du modèle d'estimation des flux.

Le tableau 18 présente les estimations de concentrations moyennes pondérées pour le débit de même que les flux sur une base annuelle. Les résultats par strate de débit et de saison sont présentés en annexe V, alors que les séries chronologiques des flux sont reproduites en figure 19. Dans l'ensemble, les résultats mettent en relief des régimes d'exportation de sédiments et d'éléments nutritifs contrastés entre les deux bassins versants, en lien avec leurs différences dans l'occupation des sols et l'influence du refoulement sur la dynamique des flux de MES, N et P.

Tableau 18. Concentrations moyennes pondérées pour le débit et charges exportées de matières en suspension et de nutriments aux exutoires des bassins versants expérimentaux de la rivière La Guerre, Intervention et Témoin, pour la période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2005-2006).

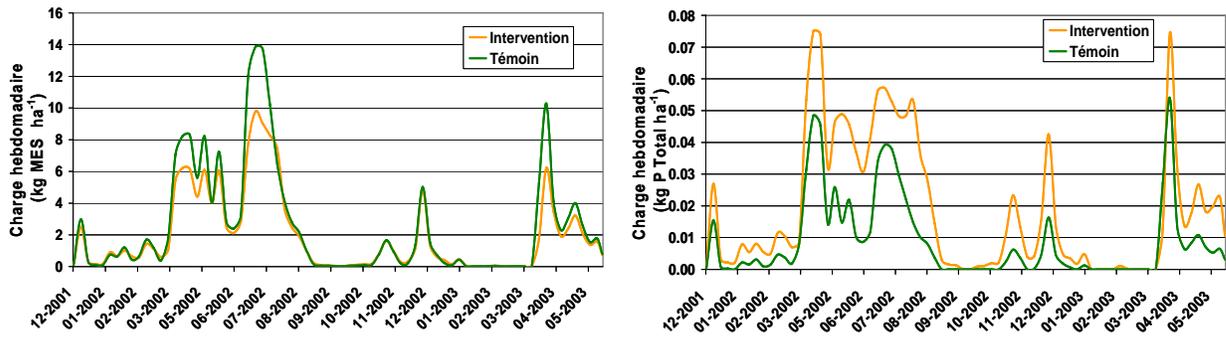
Paramètre de qualité de l'eau	Bassin Intervention						Bassin Témoin						Différence relative des charges ²
	Période de référence			Période d'évaluation			Période de référence			Période d'évaluation			
	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹	Charge (kg)	Conc. (ug L-1)	CV ¹	
Matières en suspension	67 822	15 788	0.17	163 736	37 822	0.17	60 158	19 330	0.14	219 436	63 369	0.13	-34%
Phosphore total	641	149	0.11	888	205	0.12	216	69	0.11	514	148	0.12	-42%
Phosphore biodisponible	424	99	0.13	540	125	0.15	93	30	0.13	216	62	0.12	-45%
Phosphore total dissous	405	94	0.15	554	128	0.17	58	19	0.18	138	40	0.17	-43%
Phosphore réactif dissous	370	86	0.16	523	121	0.16	45	14	0.22	114	33	0.19	-44%
Azote ammoniacal	601	140	0.25	384	89	0.21	166	53	0.22	360	104	0.34	-71%
Nitrates	26 531	6 176	0.10	16 497	3 811	0.06	8 601	2 764	0.10	7 500	2 166	0.05	-29%
Calcium	267 244	62 212	0.05	260 299	60 128	0.02	186 499	59 927	0.04	192 919	55 712	0.02	-6%
Hauteur d'eau exportée	935 mm			941 mm			958 mm			1068 mm			
Durée du monitoring	520 jours			605 jours			520 jours			605 jours			

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

⁽²⁾ Différence des charges au bassin Intervention évaluée selon le ratio des différences entre les deux périodes au bassin Témoin.

Les taux d'exportations relativement faibles de sédiments, le peu de variabilité dans leur concentration en fonction des différentes strates de débits et une relation concentration:débit aléatoire témoignent de l'influence du refoulement occasionné par le contrôle artificiel du débit de la rivière La Guerre à son embouchure. Malgré une proportion des superficies en culture relativement basse au bassin Témoin (48 %, contre 88 % au bassin Intervention) en période de référence, la charge annuelle spécifique en MES (130 kg/ha-an) y demeure légèrement supérieure à celle estimée pour le bassin Intervention (107 kg ha/ha-an). Cette différence s'est accentuée à la période d'évaluation, alors que les charges spécifiques de MES atteignent respectivement 409 et 215 kg/ha-an aux bassins Témoin et Intervention. Globalement, l'augmentation marquée des flux et concentrations de MES en période d'évaluation aux exutoires des deux bassins témoignent de l'érosivité accrue des précipitations en 2005 et 2006. L'augmentation relativement plus importante de la concentration moyenne pondérée en MES au bassin Témoin en période d'évaluation est cependant surprenante. Les superficies en cultures annuelles y ont en effet été considérablement réduites entre les périodes de référence et d'évaluation, passant de 90 à 37 % de la superficie totale en culture. Deux facteurs pourraient contribuer à expliquer ces gradients opposés dans l'occupation des sols et les exportations de sédiments entre les deux bassins, soit une sédimentation (rétention) relativement plus importante au bassin Intervention en période d'évaluation et/ou la réduction des émissions en réponse aux interventions agroenvironnementales. Compte tenu que les processus de refoulement et de sédimentation ont été atténués en période d'évaluation en raison de la nouvelle stratégie de pompage, la hausse relativement modeste (par rapport au Témoin) des flux et concentrations de MES au bassin Intervention milite plutôt pour une influence des aménagements hydro-agricoles et des pratiques culturales de conservation.

Période de référence 2001-2003



Période d'évaluation 2005-2006

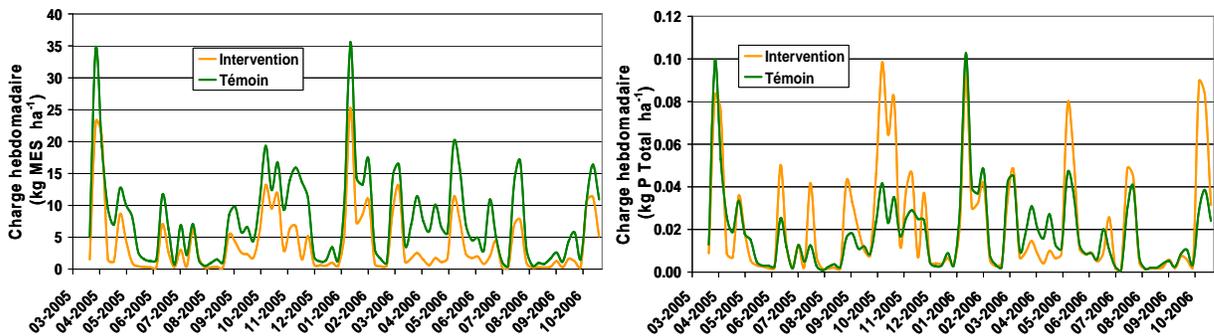


Figure 19. Flux hebdomadaires de matières en suspension et de phosphore total estimés pour les bassins versants Intervention et Témoin de la rivière La Guerre en période de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006).

En ce qui a trait au phosphore, les charges et concentrations estimées aux exutoires des bassins versants reflètent l'importance relative des superficies en culture dans les bassins à l'étude. Rappelons ici que les superficies en culture occupent respectivement 48 % et 88 % des bassins Témoin et Intervention. Les exportations de P au bassin Intervention en période de référence (0,98 kg P total/ha-an), exprimées sur la base des superficies globales des bassins, sont ainsi deux fois plus élevées qu'au bassin Témoin (0,47 kg P total/ha-an). Tout comme les MES, les taux d'exportations et les concentrations en P s'accroissent sensiblement dans les deux bassins en période d'évaluation, témoignant d'une activité hydrologique de surface accrue. Encore ici, les augmentations sont nettement plus importantes au bassin Témoin qu'au bassin Intervention. Alors que les charges de P total doublent au bassin Témoin, passant à 0,96 P total/ha-an, elles demeurent relativement stables au bassin Intervention à 1,17 P total/ha-an.

Les bassins versants démontrent par ailleurs des spéciations très contrastées dans les charges de P exportées. La fraction particulière du P exporté demeure stable à 73 % au bassin Témoin, alors qu'elle se maintient à 37 % au bassin Intervention pour les deux périodes à l'étude. La biodisponibilité du P particulière exporté demeure par ailleurs relativement faible, alors qu'elle se situe dans l'ordre de 21 % au bassin Témoin et de 8 % au bassin Intervention. Le taux relativement faible de biodisponibilité du P

particulière au bassin intervention suggère que les sédiments en suspension dans l'eau du ruisseau trouvent leur origine en grande partie dans l'érosion des rives, plutôt que l'érosion au champ. Cette dernière est en effet généralement à la source de P présentant une spéciation plus réactive. La dominance soluble des exportations de P reflètent par ailleurs les taux d'exportation en sédiments relativement faibles estimés pour ce bassin versant (103 à 215 kg/ha-an en période de référence et d'intervention respectivement). Une telle dominance des formes solubles de P met en relief que les processus d'érosion ne sont pas nécessairement les principaux vecteurs de la mobilité diffuse du P dans les bassins à l'étude. À l'instar des autres bassins versants du réseau présentant des roches mères favorables aux écoulements sub-surfaces préférentiels, la nature soluble des charges de P exportées à l'exutoire du bassin La Guerre Intervention milite pour une contribution significative des cheminements subsurfaces dans la mobilité du P vers le ruisseau.

En parallèle aux différences dans les spéciations du P exporté aux exutoires des deux bassins versants expérimentaux, une forte saisonnalité est aussi observée dans les charges et concentrations de P réactif au bassin Intervention. Une augmentation substantielle en période d'évaluation (4 X) des concentrations dans les fractions solubles et biodisponibles de P en saison de production au bassin Intervention est en effet observée pour la strate de crue du ruisseau (> 5 mm/jr). Un tel niveau d'augmentation dans les concentrations n'est pas observé en période hivernale au bassin Intervention. Une partie de l'augmentation peut être liée à une activité hydrologique de surface (7,59 mm/jr en moyenne pour la strate) plus intense au cours de la période d'évaluation qu'en période de référence (6,44 mm/jr). L'augmentation des exportations de P biodisponible, mais de moindre envergure (2 X), observée à l'exutoire du bassin Témoin pour la même strate de débit, témoigne aussi d'une activité hydrologique de surface accrue. Cet accroissement au bassin Témoin se manifeste, rappelons-le, malgré une baisse importante dans les superficies en cultures annuelles, et confirme l'occurrence de conditions hydrologiques favorables à la mobilité du P en période d'évaluation.

L'importance des augmentations des concentrations en P réactif (4 X) lors des fortes crues en saison de production au bassin Intervention porte cependant à identifier d'autres facteurs contributifs à un tel accroissement des flux de P biodisponible, sans équivalent au bassin Témoin ou en saison hivernale. L'implantation du semis direct sur la majeure partie du parcellaire du bassin Intervention en période d'évaluation est ici amenée en hypothèse dans l'explication de l'accroissement des concentrations des formes réactives de P. Malgré son effet manifeste sur l'érosion des sols, le semis direct est généralement associé à un enrichissement de la couche superficielle du sol, d'autant plus important en absence d'incorporation des engrais de ferme. Au bassin La Guerre Intervention, des hauteurs d'eau moyennes de l'ordre de 7,6 mm/jr, en réponse aux précipitations exceptionnellement abondantes et intenses de l'été et l'automne 2005 et 2006, ont assurément été associées à des contributions significatives du ruissellement de surface. Ce dernier a pu profiter d'un enrichissement en P réactif au contact des portions les plus hydro-actives du parcellaire en culture sur résidus. L'enrichissement superficiel en P conséquent aux pratiques culturales introduites au bassin Intervention demeure ainsi un

facteur plausible contribuant à l'explication d'un accroissement des formes réactives de P exportées lors des fortes crues estivales et automnales.

Rappelons que l'augmentation des concentrations de formes réactives de P n'est pas observée en saison hivernale (décembre à avril), où se concentrent habituellement la plus large part des exportations diffuses de P. Ces résultats n'invalident donc pas la culture sur résidus comme importante ligne de défense en matière de prévention de la mobilité du P. Globalement, la présente étude démontre que les charges annuelles de P total sont considérablement réduites au bassin Intervention, relativement au bassin Témoin. Elle met cependant en relief la nécessité d'évaluer la faisabilité environnementale du semis direct dans le contexte agroclimatique québécois, particulièrement pour les sols riches en P et profitant d'apports d'engrais de ferme. D'autre part, ces résultats militent pour la prise en compte de la biodisponibilité du P et de sa saisonnalité dans l'interprétation du risque environnemental et la mesure de l'efficacité des pratiques agroenvironnementales.

Au chapitre des nitrates, soulignons d'abord que les taux d'exportation aux exutoires des deux bassins en période de référence (2001-2003) reflètent essentiellement l'occupation des sols. Les charges spécifiques de nitrates estimées à 19 et 41 kg N/ha-an aux bassins Témoin et Intervention, témoignent de superficies en culture occupant respectivement 38 et 88% des superficies totales des bassins expérimentaux. Contrairement aux MES et au P, les charges de nitrates tendent cependant à diminuer entre les périodes de référence et d'évaluation pour les deux bassins à l'étude. Sur une base spécifique, les charges annuelles de nitrates passent de 19 à 14 kg N/ha au bassin Témoin, alors qu'elles décroissent depuis 41 à 22 kg N/ha au bassin Intervention. Les concentrations moyennes pondérées pour le débit des ruisseaux suivent les mêmes tendances (tableau 18). La stratification saisonnière des flux (annexe V) met en relief des concentrations nettement plus élevées en nitrates en saison de production qu'en saison hivernale, reflétant la saisonnalité dans les apports de N et dans l'activité biologique dans les sols favorables à la minéralisation et la nitrification. Les concentrations en nitrates atteignent un sommet au bassin Intervention, en période de référence, avec une concentration moyenne pondérée de plus de 10 mg/l pour la strate de débit de crue en saison de production. La réduction marquée dans les flux et les concentrations en N au même bassin en période d'évaluation reflète la réduction substantielle du bilan agronomique de l'azote qui passe de -25 kg N/ha en période de référence à -45 kg N/ha en période d'évaluation. Un tel gradient à la baisse dans les concentrations en azote observé à l'exutoire du bassin Intervention milite aussi pour une influence des pratiques de conservation mises en place, incluant la culture sur résidus, l'épandage en post-levée des cultures et les cultures de couverture sur la réduction des exportations de N. La réduction observée dans les concentrations et les flux en azote ammoniacal au bassin Intervention (tableau 18), alors que ces derniers augmentent au bassin Témoin, trouve aussi une explication plausible dans un meilleur synchronisme des apports de N lié aux meilleures pratiques culturales.

En ce qui a trait aux concentrations observées en calcium aux exutoires des bassins versants expérimentaux, les valeurs relativement élevées en période d'étiage (65 à 77 mg Ca/l) reflètent l'environnement géopédologique du bassin versant, soit des roches mères alcalines Champlain, des tills calcaires et des limons lacustres. Les concentrations

moyennes pondérées pour le débit estimées pour les deux bassins versants témoignent d'une légère réduction en période d'évaluation (tableau 18). Une contribution relativement plus importante du ruissellement de surface au bilan hydrique des deux bassins versants en période d'évaluation expliquerait ce gradient. Les concentrations en Ca apparaissent particulièrement basses dans les strates de crues hivernales ($> 5,5$ mm/jr) en période d'évaluation, alors qu'elles voisinent 40 mg Ca/l. Ce gradient géochimique témoigne d'une activité hydrologique de surface faisant une plus large place aux contributions du ruissellement de surface en cette période de l'année.

2.3.5 Réponse de la qualité de l'eau à l'action concertée

La méthode retenue pour l'étude de la réponse de la qualité de l'eau aux actions concertées dans les bassins jumeaux La Guerre diffère de celle appliquée aux autres bassins versants jumeaux du réseau (Walbridge et Fourchette). Ces derniers ont profité d'analyses de covariance (ANCOVA) de leurs observations ponctuelles et synchrones de la qualité de l'eau, permettant l'établissement de relations significatives entre les différents paramètres avant et suivant l'intervention agroenvironnementale. Tel que discuté précédemment, le refoulement inégal et parfois déphasé des écoulements des ruisseaux au bassin Témoin et Intervention de la rivière La Guerre occasionne plutôt des relations aléatoires entre les observations ponctuelles en provenance des deux bassins. Cette situation compromet ainsi la détection d'un changement en période d'évaluation sur la base d'observations ponctuelles. Les régies différentes appliquées au pompage du cours d'eau principal au cours des périodes de référence et d'évaluation compliquent par ailleurs le recours aux observations ponctuelles de qualité d'eau dans la détection de différences entre les périodes d'étude.

Plutôt que de recourir aux observations ponctuelles de qualité de l'eau, l'analyse de covariance (ANCOVA) destinée à la détection de réponses de la qualité de l'eau au bassin Intervention La Guerre a donc été appliquée aux flux hebdomadaires de sédiments et de nutriments. Rappelons ici que ces estimations de flux hebdomadaires de MES, P, N et Ca ont été compilés sur la base des modèles de régression flux/débit générés individuellement pour chacun des bassins et chacune des périodes d'étude, tel que présentés en section 2.3.4. Conceptuellement, le recours aux flux hebdomadaires facilite la mise en relation des observations colligées aux bassins Témoin et Intervention en atténuant la variabilité des paramètres associée aux fluctuations artificielles du débit du ruisseau. Au plan méthodologique, une importante mise en garde s'impose quant à l'interprétation des résultats issus d'une ANCOVA appliquée aux flux hebdomadaires. Retenons que cette approche implique l'application de régressions linéaires à des données aussi générées par modélisation statistique. Les résultats de l'ANCOVA cumulent ainsi plusieurs incertitudes, dont celle associée à l'estimation des débits et celle associée à l'estimation des flux (modèles concentration/débit). L'effet de la propagation des erreurs dans une telle approche n'a pas été étudié. Aussi, les résultats de l'ANCOVA doivent être considérés à titre indicatif, en support à l'interprétation des effets et interactions des conditions hydrologiques, des saisons et des actions agroenvironnementales sur les flux de sédiments et de nutriments à l'exutoire du bassin Intervention. Compte tenu de la propagation incertaine des erreurs liée à cette approche, il est estimé que la simple

comparaison des flux estimés aux bassins Témoin et Intervention au moyen des modèles concentration/débit et présentés précédemment (tableau 18) constitue le meilleur indicateur de l'influence de l'action concertée sur la qualité de l'eau au bassin Intervention.

Les résultats de l'analyse de covariance appliquée aux estimations de flux hebdomadaires de sédiments et de nutriments aux exutoires des bassins Témoin et Intervention de la rivière La Guerre sont présentés aux tableaux 19 et 20. Dans l'ensemble, les résultats de l'ANCOVA expriment des gradients similaires à ceux mis en relief par les modèles de flux. Globalement, les effets de la période sont significatifs et témoignent de réductions tangibles des flux de MES et de P en période d'évaluation au bassin Intervention. Les modèles ANCOVA mettent aussi en relief une saisonnalité dans la réponse de la qualité de l'eau aux interventions agroenvironnementales pour tous les paramètres de P. Pour le P total, une augmentation significative de 58 % ($p < 0,001$) dans les flux hebdomadaires en saison de production par rapport à la saison hivernale est mise en relief, quelque soit la période. Pour les fractions réactives de P (biodisponible et en solution), l'interaction significative PÉRIODE X SAISON indique que la réduction des flux en période d'évaluation est relativement plus importante en hiver qu'en saison de production.

Tableau 19. Valeurs F et probabilités associées aux effets et interactions du modèle d'analyse de covariance appliquées aux flux hebdomadaires du bassin Intervention La Guerre utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.

		Effets et interactions du modèle ANCOVA (N=110)						
Paramètre	Valeur F Prob >F	PERIODE	SAISON	PERIODE* SAISON	TÉMOIN (Covariable)	TÉMOIN* PÉRIODE	TÉMOIN* SAISON	TÉMOIN* PÉRIODE *SAISON
		MES	Valeur F Pr > F	36,52 <,0001	3,45 0,0662	0,06 0,8101	459,83 <,0001	9,44 0,0027
PTOT	Valeur F Pr > F	1,48 0,2263	33,23 <,0001	0,95 0,3308	335,66 <,0001	11,31 0,0011	- -	- -
Pbio	Valeur F Pr > F	7,26 0,0083	13,68 0,0004	8,99 0,0034	164,70 <,0001	18,44 <,0001	8,36 0,0047	8,33 0,0048
Psoln	Valeur F Pr > F	1,18 0,2798	6,33 0,0135	8,20 0,0051	113,78 <,0001	5,49 0,021	2,08 0,1528	8,65 0,0041
Ca	Valeur F Pr > F	8,16 0,0052	8,47 0,0044	12,14 0,0007	942,48 <,0001	- -	13,37 0,0004	

Tableau 20. Moyennes (anti-log) ajustées au modèle de covariance des observations de flux hebdomadaires du bassin Intervention La Guerre utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.

Paramètre	Moyennes (anti-log) ajustées Au modèle de covariance (N=110)				Différences Pour l'effet Période ⁽¹⁾	
	Référence	Référence	Évaluation	Évaluation	Production	Hiver
	Hiver	Production	Hiver	Production		
MES (kg/ha-sem)	3,71	4,18	1,82	2,12	-47% ***	-47% ***
PTOT (g/ha-sem)	25,00	36,50	9,95	16,94	-57% ***	-57% ***
Pbio (g/ha-sem)	15,36	23,71	5,38	10,28	-57% ***	-65% ***
Psoln (g/ha-sem)	13,49	24,15	6,93	13,81	-43% ***	-49% ***
Ca (kg/ha-sem)	0,898	0,878	0,910	0,869	NS	NS

¹ Exprime la tendance temporelle au bassin intervention, soit la différence des moyennes ajustées au modèle ANCOVA (Période d'évaluation - Période de référence). La différence des moyennes rapportée s'applique à la valeur médiane du paramètre pour le percentile 50% (médiane) au bassin témoin. Puisqu'il y a interaction significative du paramètre avec la période, les pentes des régressions diffèrent entre les périodes.

Taux de probabilité: ***: P<0.001; **: P<0.01; *: P<0,05

Les interactions significatives de la covariable (flux au bassin Témoin) avec la période pour les paramètres de MES et toutes les fractions du P mettent cependant en relief que les réductions détectées varient considérablement en fonction de l'activité hydrologique du cours d'eau. Cette interaction est illustrée à la figure 19 pour les paramètres MES et P total. L'interaction significative COVARIABLE X PÉRIODE fait en sorte que les pentes de régression diffèrent entre les périodes de référence et d'évaluation. Conceptuellement, une pente de régression significativement plus faible en période d'évaluation indique que l'effet de l'action concertée sur la qualité de l'eau au bassin Intervention a eu un impact relativement moins important sur les charges hebdomadaires les plus élevées. Pour le paramètre MES par exemple, l'interaction COVARIABLE X PÉRIODE implique que le flux hebdomadaire au bassin Intervention passe de 4,7 kg/ha en période de référence à 2,5 kg/ha en période d'évaluation (réduction de 47 %), pour un flux de référence médian de

6,3 kg/ha au bassin Témoin. Au percentile de 90 % de la distribution au bassin Témoin (15,9 kg/ha), la réduction n'est plus que de 31 % au bassin Intervention.

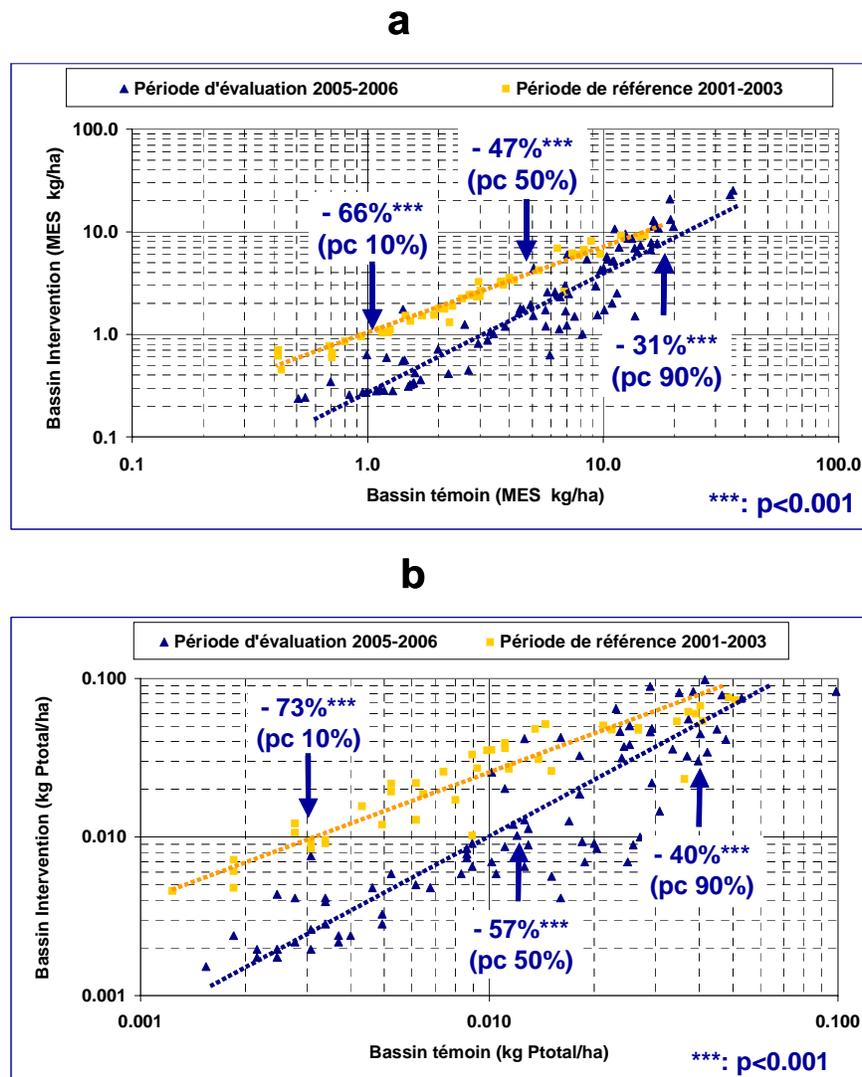


Figure 20. Courbes de régression représentatives de l'interaction entre la période et la covariable du dérivées du modèle ANCOVA appliqué flux hebdomadaires de MES (a) et de P total (b) du bassin Intervention La Guerre utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.

L'interaction significative COVARIABLE X PÉRIODE associée au paramètre du P total témoigne d'un gradient similaire aux MES. La réduction de flux au bassin Intervention passe de 57 % au percentile médian de référence du bassin Témoin, à 39 % au 90^e percentile. Pour les fractions réactives de P, la triple interaction COVARIABLE X PÉRIODE X SAISON indique que les réductions de flux sont moins importantes lors des crues les plus chargées en P (interaction avec la covariable), et que cette réduction est encore moins importante, voire non significative, en saison de production. La figure 20 met en relief cette triple interaction sur le paramètre de P biodisponible. En saison hivernale, les flux hebdomadaires sont significativement moins élevés en période

d'évaluation qu'en période de référence. Les réductions sont alors de l'ordre de 65 % et 57 % respectivement, pour les 50^e et 90^e percentiles des flux hebdomadaires au bassin Témoin. En saison de production, la réduction détectée en période d'évaluation n'est pas significative pour les charges hebdomadaires élevées de P biodisponible, soit au-delà du 50^e percentile au bassin Témoin. Cette interaction reflète la moyenne des concentrations pondérée pour le débit du P biodisponible particulièrement élevée au bassin Intervention en saison de production (271 ug L⁻¹ P; annexe 5.4.3) et soulève à nouveau l'hypothèse de l'influence des pratiques culturales sur la mobilité du phosphore, tel que discuté en section 2.3.4.

Les influences contrastées des actions agroenvironnementales sur les différentes fractions de P exporté mises en relief dans le cadre de la présente étude mettent en relief l'importance de prendre en considération la spéciation et la saisonnalité des exportations de P dans l'évaluation des bénéfices environnementaux résultant de l'action concertée sur la qualité de l'eau. D'une part, la fraction biodisponible de P demeure un meilleur indicateur de l'impact potentiel de la charge diffuse sur l'écosystème aquatique que le P total. D'autre part, des concentrations élevées et réactives de P ont un impact potentiellement plus important sur l'écosystème en période printanière et estivale aquatique qu'en saison hivernale.

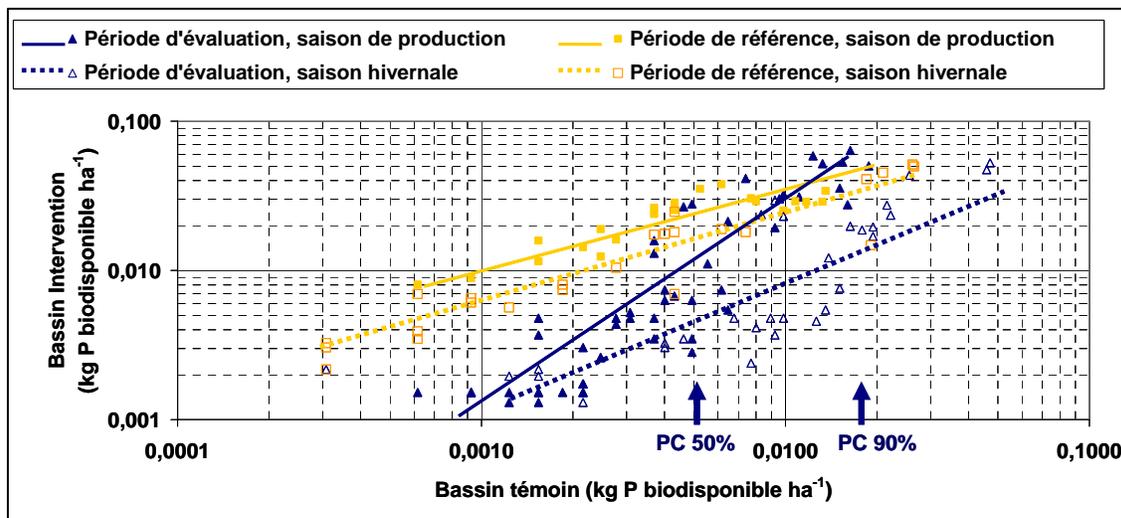


Figure 21. Courbes de régression représentatives de l'interaction entre la période, la saison et la covariable dérivées du modèle ANCOVA appliqué aux flux hebdomadaires de P biodisponible du bassin Intervention La Guerre utilisant les observations du bassin Témoin en covariable.

En conclusion, retenons que la comparaison des flux des bassins jumeaux au cours de la période de référence à ceux observés en période d'évaluation met en relief une réduction tangible des exportations annuelles de sédiments (- 34 %), de phosphore total (- 42 %) et de nitrates (- 29 %) à l'exutoire du bassin intervention. Globalement, ces réductions dans les exportations de sédiments et de nutriments sont la résultante d'un ensemble d'actions agroenvironnementales entreprises au cours de la période d'évaluation, incluant 1) l'aménagement hydro-agricole du cours d'eau, des berges et du parcellaire du bassin Intervention, 2) l'introduction de pratiques culturales anti-érosives et de cultures de

couverture, 3) une transition à des épandages réalisés en période de croissance des cultures et à l'ajustement approprié de la fertilisation des cultures et enfin 4) la régulation des pompages à l'embouchure de la rivière La Guerre. Le dispositif d'étude à l'échelle du bassin versant a permis de détecter et de quantifier la réponse de la qualité de l'eau à l'influence globale de ces actions. Le dispositif ne permet cependant pas de déterminer les influences respectives des différentes interventions, ou d'en évaluer la synergie. Une réponse relativement rapide des flux de sédiments et de phosphore indique d'emblée que les facteurs déterminants du transport des MES et du P ont joué ici un rôle prédominant.

- L'aménagement systématique de bandes riveraines sur les cours d'eau et fossés du bassin versant a contribué à briser la « connectivité » (hydrologique) entre les abords des champs et les ruisseaux, réduisant ainsi le transport de sédiments et de nutriments via le ruissellement de surface. La protection des talus d'une portion importante du bassin intervention au moyen de techniques de biogénie végétal a aussi sûrement contribué à réduire les exportations de sédiments liés aux décrochages des talus. En effet, la caractérisation de l'état des rives réalisée en période de référence mettait en relief des talus lourdement affectés par l'érosion, exacerbée par des niveaux de l'eau artificiellement élevés en période estivale.

- L'implantation de structures de contrôle du ruissellement dans les zones du parcellaire les moins bien égouttées, ou vers lesquelles se concentrent le cheminement du ruissellement, a contribué à laminar les crues à forte composante de ruissellement et a favorisé la sédimentation au champ. L'aménagement de chutes enrochées, de perrés, de puits d'infiltration, de bassins de captage et d'avaloirs ont permis l'évacuation plus « en douceur » des lames d'eau ruisselées, réduisant du coup la capacité du ruissellement à arracher et transporter la terre hors du champ, tout en assurant un drainage adéquat de ces secteurs.

- La conversion de plus de la moitié des superficies en cultures annuelles du bassin Intervention aux pratiques culturales de conservation (semis direct et cultures de couverture) a définitivement joué un rôle de premier plan dans la réduction des exportations diffuses de sédiments et de phosphore particulaire, typiquement associés aux processus de ruissellement de surface. L'efficacité de ces pratiques culturales à favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol et à prévenir l'arrachement et le transport de sédiments a largement été démontrée dans le cadre d'autres études à l'échelle de la parcelle. L'augmentation des concentrations des fractions solubles et biodisponibles de P en saison de production au bassin Intervention demeure cependant préoccupante. Une implication pratique de cette observation illustre toute l'importance à concilier les bénéfices de l'incorporation des engrais de ferme avec ceux de la culture sur résidus dans les systèmes culturaux. Au plan de l'acquisition des connaissances, ce gradient témoigne une fois de plus de la pertinence de baliser la faisabilité environnementale du semis direct dans les sols riches et profitant d'épandage d'engrais de ferme dans les conditions agroclimatiques et pédologiques propres au Québec. À l'instar des autres bassins du réseau d'étude, les résultats de La Guerre appellent aussi à une meilleure compréhension de la mobilité subsurface du P dans les sols argileux drainés.

- La réduction importante des apports d'azote, associée aux nouveaux calendriers d'épandage et à l'implantation de cultures de couverture, de même qu'une possible influence du semis direct sur la minéralisation de l'azote organique et le taux de nitrification, ont tous pu contribuer à une réduction relative des flux de nitrates à l'exutoire du bassin Intervention. Ce gradient temporel dans les exportations de nitrates met en relief que des actions ciblées sur les sources d'azote sont susceptibles de porter fruit au plan de la qualité de l'eau à relativement court terme, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour le phosphore. Cette efficacité de la réduction à la source sur la qualité de l'eau tient à la mobilité « instantanée » des nitrates vers les cours d'eau, préférentiellement par les voies du drainage souterrain.
- Enfin, l'effet de la nouvelle stratégie de gestion des pompages à l'exutoire du bassin La Guerre adoptée en période d'évaluation demeure difficile à relativiser. Une influence relativement plus marquée des phénomènes de refoulement de l'écoulement au bassin Intervention (en raison d'une élévation de quatre mètres plus basse qu'au bassin Témoin) a probablement contribué aux concentrations de P total et de MES qui y ont été observées en période de référence. La régulation des pompages en période d'évaluation aurait ainsi contribué à la réduction significative de la concentration en MES et en P total. Cette contribution hydrodynamique à la réduction globale des charges estimées de MES et de P total, complémentaire à celle associée aux aménagements hydro-agricoles et aux pratiques culturales de conservation, demeure à toutes fins pratiques inconnue.

Hormis l'incertitude sur l'efficacité relative des différentes actions agroenvironnementales mises de l'avant dans le bassin versant Intervention de la rivière La Guerre, il n'en demeure pas moins que la détection d'une réponse de la qualité de l'eau d'une telle amplitude est sans précédent au Québec. Des réponses significatives ont été observées dans les autres bassins jumeaux du réseau (Walbridge et Fourchette), mais d'une ampleur moindre, alors que les interventions y ont été centrées sur l'aménagement de bandes riveraines et les structures de contrôle du ruissellement. Dans le cas du bassin La Guerre, l'action synergique des pratiques agricoles anti-érosives et de l'aménagement des terres contribue sans doute à l'amplitude de la réponse de la qualité de l'eau.

2.4 Analyse technico-économique

Les retombées aux investissements consentis par les producteurs agricoles et les contributions en fonds publiques dans la mise en valeur des bassins versants Intervention du ruisseau Fourchette, du ruisseau Walbridge et de la rivière La Guerre sont multiples. Ils se conjuguent tant en bénéfices à la ferme, principalement en gain de productivité des productions végétales, de même qu'en bénéfices communautaires, principalement liés à l'amélioration de la qualité de l'eau, à la préservation de la biodiversité du milieu naturel, de même qu'à la qualité de la vie en lien avec les différents usages de l'eau. Certains de ces bénéfices sont directs et peuvent profiter d'évaluation quantitative. C'est le cas notamment des coûts et durée de vie associés à l'aménagement et à l'entretien des ouvrages hydro-agricoles. Plusieurs bénéfices, principalement d'ordre communautaire, sont indirects par nature. Ils se prêtent plus difficilement à une évaluation quantitative et relèvent de compétences et d'analyses hors de portée du présent contexte d'étude.

Les principaux coûts engendrés par la mise en œuvre des actions concertées dans les bassins versants agricoles Intervention du réseau d'étude sont liés à l'aménagement hydro-agricole des cours d'eau et du parcellaire en culture. Aussi, l'analyse technico-économique des coûts et bénéfices associés aux interventions agroenvironnementales dans le cadre du présent projet s'est centrée sur l'aménagement des cours d'eau et du parcellaire.

La perspective d'améliorer l'égouttement du parcellaire et de réduire les contributions monétaires récurrentes liées aux travaux d'entretien des cours d'eau municipaux comptait, dès le départ du projet, parmi les principales motivations des propriétaires riverains des bassins Intervention à participer à l'action concertée à l'échelle de leurs bassins versants. Les propriétaires riverains des bassins versants de la rivière La Guerre et du ruisseau Fourchette se plaignaient des inconvénients occasionnés par l'accumulation de sédiments et le ravinement des talus de leurs cours d'eau, qui requéraient des travaux d'entretien à environ tous les 15 ans. Au ruisseau Walbridge, c'est l'accumulation de sédiments à certains endroits du cours d'eau municipal qui indisposait le plus les riverains. L'envasement du lit du ruisseau était à la source de problèmes d'égouttement du parcellaire et requérait un entretien environ à tous les 20 ans.

Le détail des coûts associés à l'aménagement et l'entretien des cours d'eau municipaux, des bandes riveraines et des ouvrages de contrôle du ruissellement réalisés dans chacun des bassins versants est présenté en annexe VI. Globalement, le coût spécifique des interventions se situait en 2003 respectivement à 210, 65 et 130 \$/ha pour les superficies en culture des bassins Intervention Fourchette, Walbridge et La Guerre. Ces dépenses couvrent l'implantation de bandes riveraines arborescentes, arbustives ou herbacées, leur entretien durant les trois années suivant l'implantation, la stabilisation de talus par génie végétal, de même que les travaux d'aménagement hydro-agricole réalisés dans les cours d'eau, en rive et aux exutoires du parcellaire. Les coûts associés à la réalisation des interventions ont été partagés entre le fonds initial du projet (FAQDD), les MRC Brome-Missisquoi et Nouvelle-Beauce, la municipalité de Saint-Anicet, le programme Prime-Vert du MAPAQ, le programme défi-solution du CDAQ, l'IRDA et les propriétaires agriculteurs des bassins intervention. La part de ces derniers se situent à environ 30 % du coût des interventions, quelque soit la source de financement ou l'aménagement ciblé. Dans les trois bassins versants, la participation des agriculteurs propriétaires à l'aménagement concerté du bassin versant a été, à toutes fins pratiques, unanime.

Il est estimé que les investissements consentis dans l'aménagement et la protection des cours d'eau dans le cadre du projet prolongeront la vie utile des tronçons de la rivière La Guerre et du ruisseau Fourchette pour une période de 15 années additionnelles, alors que le prolongement de la vie utile est estimée à 10 ans pour le ruisseau Walbridge. Cette hypothèse conservatrice de l'augmentation de la durée de vie utile du cours d'eau est redevable à la participation de l'ensemble des riverains du bassin versant à la protection des rives et la prévention des foyers d'érosion. Sur la base de ces augmentations de durée de vie utile et des coûts liés aux travaux réalisés (annexe VI), les économies annuelles escomptées se situent respectivement à 1 517 \$, 1 024 \$ et 2 327 \$, respectivement, pour

les bassins versants Intervention Fourchette, Walbridge et La Guerre (tableau 21). Les retours sur l'investissement se situent ainsi entre 22 et 24 ans pour l'ensemble des bassins à l'étude.

Tableau 21. Investissements et retombés économiques dans la gestion et l'entretien du réseau hydrographique suite aux aménagements de 2003 - 2004 dans les 3 bassins d'Interventions.

	Bassin Intervention		
	Rivière La Guerre	Ruisseau Fourchette	Ruisseau Walbridge
Coûts			
Investissement	52 555 \$	39 815 \$	24 651 \$
Bénéfice			
Économies annuelles escomptées	2 327 \$	1 517 \$	1 024 \$
Retour sur l'investissement	22,6 ans	26,3 ans	24,1 ans

Dans l'ensemble, l'analyse sommaire des coûts et bénéfices associées aux travaux hydro-agricoles démontrent une rentabilité à moyen terme dans les trois régions à l'étude. Cette justification économique, au seul plan du coût d'entretien des cours d'eau municipaux, implique que toutes les autres retombées directes et indirectes, au bénéfice de la ferme ou de celle de la communauté en aval, s'inscrivent en dividendes aux investissements consentis dans le projet de mise en valeur du bassin versant. Au premier plan des bénéfices à la ferme s'inscrivent l'amélioration de l'égouttement de certains secteurs du parcellaire en culture, voire la récupération de zones de champ improductives en raison d'un égouttement déficient. Les diagnostics de l'égouttement du bassin versant, réalisés en début de projet à pieds d'œuvre et avec le support de la télédétection, témoignaient de secteurs problématiques au plan de l'égouttement dans les trois régions à l'étude. À l'instar de la grande majorité du parcellaire en culture au Québec, l'égouttement et la condition physique des sols qui en découle viennent en tête de liste des principaux facteurs limitant le rendement des cultures. Il est ainsi présumé que l'amélioration apportée à l'égouttement du parcellaire des bassins Intervention à l'étude s'est soldée par des gains en productivité des productions végétales pour certaines entreprises des bassins Intervention.

Le suivi de qualité de l'eau associé au projet a démontré que la combinaison des aménagements hydro-agricoles et des pratiques agricoles de conservation implantés après la période de référence ont eu un impact tangible sur un ou plusieurs paramètres de qualité de l'eau en période d'évaluation. Le cadre de l'étude ne permet cependant pas d'associer un « rendement environnemental » à l'une ou l'autre des actions agroenvironnementales. Les gradients détectés dans la qualité de l'eau du bassin de la rivière La Guerre, attribués en partie à l'implantation des pratiques culturales de conservation, suggèrent un rapport coût-bénéfice particulièrement avantageux associé aux pratiques culturales anti-érosives dans la réduction des exportations diffuses de sédiments et de nutriments. Rappelons ici qu'un bon égouttement du champ demeure cependant une prémisses à une transition fructueuse au système de cultures sur résidus.

L'importance d'assurer un bon égouttement des parcelles en culture sur résidus s'impose au plan environnemental, dans la mesure où cette pratique favorise l'enrichissement de la couche superficielle du sol qui interagit avec le ruissellement de surface. Aussi, l'investissement dans l'égouttement du parcellaire est complémentaire, voire conditionnel, aux pratiques culturales de conservation, dans la recherche de rendements optimums des cultures et la réduction à la source de la contamination diffuse des eaux de surface en milieu agricole.

2.5 Impacts du réseau

Les principales retombées du réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles se mesurent à deux niveaux. Au plan environnemental, les actions concertées à l'échelle des bassins versants se sont traduites en réponses tangibles de la qualité de l'eau. Dans une perspective opérationnelle et scientifique, l'accompagnement des initiatives communautaires de mise en valeur des bassins versants s'est aussi traduite en développement de connaissances et d'outils spécifiquement adaptés à l'échelle au contexte d'action communautaire dans les trois bassins versants à l'étude

2.5.1 Développement de méthodes et d'outils de diagnostic agroenvironnemental

La rencontre des objectifs du réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles a requis le développement ou l'adaptation de différentes techniques et méthodes de caractérisation du parcellaire, de l'hydrologie et de la qualité de l'eau des six bassins versants à l'étude. Dans la mesure où ces méthodes ont été appliquées et validées dans trois régions agricoles du Québec, présentant des régimes climatiques et des environnements géophysiques contrastés, elles sont considérées comme applicables à l'ensemble du territoire agricole québécois dans le cadre de projets d'envergure similaire.

2.5.1.1 Télédétection et atlas agroenvironnementaux

La planification et la réalisation des aménagements hydro-agricoles à l'échelle des bassins versants Intervention ont profité d'une représentation spatiale de leurs propriétés topographiques, pédologiques et hydrographiques, de même que d'un diagnostic de l'égouttement et de l'érosion du parcellaire à haute résolution (1 m) faisant appel à la télédétection aéroportée, des modèles numériques d'élévation (MNE) de haute précision générés au moyen de capteurs GPS au sol de même qu'un inventaire photographique et géopositionné des marques d'érosion en rive et au champ.

Le recours aux atlas électroniques supportés par le logiciel de géomatique TNT-Atlas s'est avéré un moyen convivial de transmettre sans frais l'ensemble des données à référence spatiale générées dans le cadre du projet auprès des conseillers et producteurs agricoles impliqués dans les trois régions à l'étude. Les diagnostics de l'égouttement du parcellaire ont particulièrement suscité l'intérêt des conseillers et des producteurs agricoles partenaires au projet et contribué à la promotion de ces technologies. Ces

diagnostics ont permis de déterminer les zones critiques, particulièrement sensibles à la production de ruissellement de surface et l'exportation de sédiments et nutriments vers le réseau hydrographique. La localisation de ces zones hydro-actives sensibles, généralement situées en position basse du relief ou ceinturant le réseau hydrographique, a facilité la planification, sur mesure, des pratiques et aménagements hydro-agricoles qui concilient l'égouttement des sols et la préservation de la qualité de l'eau.

Le diagnostic d'égouttement du parcellaire des trois bassins Intervention a mis en relief la pertinence de jumeler l'acquisition aéroportée et printanière d'images multispectrales avec la capture de données de haute précision du relief au moyen de capteurs GPS mobiles. Conceptuellement, les indices de brillance générés à partir des images numériques captées au moment du ressuyage printanier des sols indiquent les secteurs du parcellaire qui présentent un déficit d'égouttement, alors que l'analyse des parcours de l'eau générés depuis le modèle numérique d'élévation (MNE) permet d'en interpréter les causes. Dans l'ensemble des bassins, des corrélations spatiales ont été mises en relief entre les secteurs du parcellaire présentant de faibles indices de brillance, la convergence des parcours du ruissellement, de faibles rendements de cultures et l'observation de marques d'érosion (Duguet et coll., 2002). Les zones du parcellaire affectées par un déficit dans l'égouttement et une faible productivité constituent aussi les principales zones d'émission de ruissellement de surface, principal vecteur de transport de sédiments et de phosphore vers les eaux de surface. Le diagnostic et la correction des problèmes d'égouttement ciblés par les interventions hydro-agricoles constituent dès lors un investissement gagnant-gagnant pour la productivité des entreprises et la prévention de la pollution diffuse de l'eau de surface. En parallèle aux données acquises et financées à même le projet, des images aéroportées additionnelles ont été acquises par des entreprises agricoles, notamment dans le bassin versant de la rivière La Guerre.

Au plan des activités de recherche, le projet a pavé la voie à de nouveaux développements techniques et scientifiques appliqués au diagnostic et à la régulation du parcellaire. L'équipe du projet a ainsi apporté son soutien à la réalisation d'une vingtaine d'atlas électroniques en support aux actions concertées en bassins versants dans le cadre du réseau de mise en valeur de la biodiversité (IRDA et MAPAQ, 2007) et du plan d'action concertée sur la qualité de l'eau (IRDA et MAPAQ, 2008). Dans le bassin versant de la rivière aux Brochets, la capture aéroportée de données LiDAR dans le cadre du projet GRISE (Michaud et coll., 2009c) est venue remplacer la capture au sol de mesures d'élévation au moyen de relevés GPS. Les relevés continus de mesures d'élévation ont permis notamment le développement d'utilitaires permettant de représenter spatialement des prédictions de hauteurs de ruissellement et de pertes de sol, de proposer des critères de conception d'ouvrages de contrôle du ruissellement de même que des zones intra-parcellaires de gestion localisée des sols. Ces données et outils à référence spatiale ont appuyé l'aménagement hydro-agricole systématique du bassin sur plus de versant Ewing sur plus de 30 km² et ont fait l'objet d'évaluations individuelles de la part de 23 entreprises sur plus de 260 champs diagnostiqués (Michaud et Ruyet, 2009). Une approche similaire a été appliquée aux bassins versants du ruisseau Saint-Louis et de la Petite rivière Pot au Beurre près de l'embouchure du bassin versant de la rivière Yamaska en appui à des actions concertées sur la qualité de l'eau (UPA et coll., 2007).

2.5.1.2 Analyses hydrologiques

La réalisation du projet a permis de développer une méthode de séparation des hydrogrammes sur la base du signal de conductivité électrique (sonde multi-paramètre) enregistré de façon continue aux exutoires des bassins expérimentaux. Les résultats issus de cette méthode ont permis de décrire avec précision, à l'échelle temporelle de l'évènement de crue du ruisseau, la distribution et l'intensité des lames d'eau évacuées par le ruissellement de surface et les écoulements de sub-surface (principalement via les drains agricoles) dans deux régions agricoles présentant des régimes hydriques fortement contrastés (bassins jumeaux Walbridge en Montérégie-Est et Fourchette en Beauce).

L'approche de segmentation des hydrogrammes développée dans le cadre du réseau d'étude est maintenant mise à profit dans le cadre de différentes activités de recherche et de développement à l'échelle du parcellaire et du bassin versant. La caractérisation des phénomènes hydrologiques apportée par cette technologie a notamment appuyé l'interprétation de la mobilité souterraine du phosphore dans les champs d'un bassin versant de la rivière aux Brochets (Michaud et coll., 2009b). Au plan opérationnel, cette caractérisation des cheminements hydrologiques prend toute son importance dans la recherche de solutions bien adaptées aux différentes sources de contamination diffuse des eaux de surface

2.5.1.3 Mesure des flux de sédiments et nutriments

Le monitoring des exutoires des bassins versants appuyé par le suivi hydrométrique en continu des ruisseaux (mesures de débits) et la prise ponctuelle d'échantillons d'eau lors des crues des ruisseaux ont permis d'estimer de façon relativement précise (coefficients de variation de l'ordre de 10 à 15 %) les flux exportés des six bassins versants expérimentaux. L'approche retenue, ciblée sur l'analyse de régression des concentrations en fonction du débit (C/Q) pour des strates distinctes de régime hydrique et de saison, s'est avérée bien adaptée au contexte opérationnel d'actions concertées en bassins versants où des estimations de charges sont requises.

La comparaison des modèles de régression concentration/débit propres aux différents ruisseaux a mis en relief des signatures spécifiques à chacun des bassins versants quant à la réponse de la qualité de l'eau au régime hydrique. Les pentes et les ordonnées à l'origine de ces régressions reflètent les caractéristiques géophysiques des bassins (relief, propriétés des sols) de même que leur utilisation (cultures, bilans d'apport et pratiques culturales). L'analyse de covariance de ces paramètres, utilisant le débit en covariable, permet des comparaisons statistiques entre différents bassins ou différentes périodes (saisons ou pré- vs post-intervention). Dans un contexte opérationnel, ces signatures C/Q spécifiques aux bassins versants constituent des indicateurs privilégiés afin de comparer, sur une base relative, les pressions agroenvironnementales auxquelles sont soumises différents sous-bassins versants.

La méthode de mesure des flux de sédiments et de nutriments retenue dans le cadre de la présente étude est transférable à d'autres bassins versants où les sources diffuses contribuent à la majeure partie des exportations. Sur le plan méthodologique, une implication pratique des résultats de l'étude est la nécessité de cibler les crues du ruisseau lors des échantillonnages ponctuels de façon à estimer convenablement les flux exportés. Ces derniers se concentrent, dans le temps, lors des plus fortes crues du ruisseau, associées à de fortes composantes de ruissellement de surface. Une seconde implication a trait à la saisonnalité des relations concentration/débit mise en relief pour la plupart des paramètres de qualité de l'eau et des bassins versants dans le cadre de l'étude. Cette saisonnalité doit nécessairement être prise en compte dans les estimations et les comparaisons des flux, de même que dans l'interprétation de leurs impacts environnementaux.

2.5.1.4 Détection de réponse de la qualité de l'eau aux actions agroenvironnementales

La détection de réponses de la qualité de l'eau aux actions concertées dans le cadre de l'étude a été supportée par des échantillonnages synchrones de bassins versants jumeaux, principalement en période d'intense activité hydrologique. Les gradients dans la qualité de l'eau au bassin Intervention entre les différentes périodes d'étude (référence et évaluation) ont été détectés au moyen d'analyses statistiques de covariance (ANCOVA), utilisant les observations colligées à l'exutoire du bassin Témoin en covariable. Cette méthode s'est avérée efficace et sensible dans la détection de réponses de la qualité de

l'eau aux actions concertées des entreprises agricoles dans les bassins versants Intervention. A priori, cette méthode visait à soustraire la détection d'une réponse de la qualité de l'eau à l'importante variabilité interannuelle généralement observée dans les conditions climatiques et hydrologiques. Compte tenu de l'important contraste dans les précipitations et l'activité hydrologique des bassins entre les périodes de référence (2001-2003) et d'évaluation (2004-2006), ces résultats valident en soi la pertinence et la sensibilité de la méthode fondée sur l'échantillonnage ponctuel et simultané de bassins jumeaux (Témoin et Intervention) en période de crue des ruisseaux. L'approche méthodologique a aussi permis de prendre en compte bon nombre d'interactions saisonnières et hydrologiques qui ont influé sur la mobilité des sédiments et des nutriments. Cette méthode de détection de gradients dans la qualité de l'eau, utilisant les observations d'un bassin témoin en covariable, peut ainsi être transposée à d'autres régions d'étude où la détection de gradients temporels dans la qualité de l'eau est souhaitée. Retenons cependant que le suivi hydrométrique en continu des exutoires et le recours à un bassin Témoin demeurent des conditions essentielles à la faisabilité de cette approche.

2.5.1.5 Modélisation hydrologique

La disponibilité de séries chronologiques de données pertinentes à l'hydrologie, à la qualité de l'eau, aux propriétés géophysiques et à la régie des sols de bassins versants expérimentaux demeurent le principal actif dans la réalisation de recherches appliquées en agroenvironnement. Rappelons le principe que tout modèle hydrologique ou tout outil d'indexation des risques environnementaux n'est recevable que s'il a profité d'un calage et d'une validation sur la base d'observations acquises sur le terrain au cours de son développement. C'est dans ce contexte que la disponibilité de données pertinentes à l'hydrologie des bassins et à la qualité de l'eau prend toute son importance. Les observations pertinentes aux milieux terrestre et aquatique colligées dans le cadre du réseau d'actions concertées en bassins versants ont épaulé, et supportent encore aujourd'hui, la réalisation d'outils de gestion s'adressant aux conseillers et producteurs agricoles, ou répondant à des besoins stratégiques à l'échelle du territoire, tels que :

- le développement et la validation de l'Outil de diagnostic des exportations de phosphore à l'échelle de la parcelle (Michaud et coll., 2008a);
- l'étude des scénarios agroenvironnementaux permettant de rencontrer les charges cibles de P dans le bassin versant de la rivière aux Brochets (Michaud et coll., 2007; Deslandes et coll. 2007);
- l'étude des interactions entre différentes pratiques de gestion bénéfiques avec le support de la modélisation hydrologique (Michaud et coll., 2007).

2.5.2 Action collective et qualité du milieu

L'évaluation environnementale de l'efficacité des actions concertées à l'échelle des bassins versants expérimentaux au moyen de suivis de la qualité de l'eau était un des principaux objectifs du réseau d'étude implanté dans les régions à l'étude. Le tableau 22 rapporte les flux de sédiments et de nutriments estimés aux exutoires des bassins

expérimentaux du ruisseau Fourchette, du ruisseau Walbridge et de la rivière La Guerre en période de référence (2001-2003) et en période d'évaluation (2004-2006). Les flux rapportés sur une base annuelle et spécifique (kg/ha) facilitent les comparaisons entre les périodes et les bassins versants.

La fonte des neiges, les redoux hivernaux et les précipitations sur sol gelé contribuent au bilan relativement élevé des exportations dans le ruisseau Fourchette, en Beauce, comparativement à ceux situés en Montérégie. L'hiver beauceron s'est aussi montré déterminant sur la réponse de la qualité de l'eau à l'aménagement systématique des rives de cours d'eau, en proie à une sévère problématique d'érosion précédant la réalisation du projet. Le monitoring des ruisseaux témoigne en effet d'une réduction sans équivoque de l'ordre de 35 % des flux de sédiments en réponse à l'aménagement des terres et du cours d'eau en saison de production (mai à novembre). L'effet de l'intervention n'est cependant pas significativement détecté en période hivernale. La saturation généralisée des sols, encouragée par le gel et par la position élevée de la nappe, favorise alors les transferts de surface, minimisant l'efficacité des structures de contrôle du ruissellement et des bandes riveraines sur le laminage des crues, la sédimentation et le bris de la connectivité hydrologique entre les champs et le cours d'eau. Au plan opérationnel, une implication pratique découlant de ces résultats est que l'efficacité des aménagements hydro-agricoles à réduire les charges de sédiments et de nutriments associés au ruissellement de surface tend à diminuer dans les régions soumises à un important ruissellement nival.

Rappelons d'autre part que les flux de phosphore estimés au bassin Fourchettes n'ont pas suivi la tendance à la baisse associée aux sédiments au bassin Intervention. Une réduction des flux de sédiments dans ce bassin, principalement tributaire de la correction des foyers généralisés d'érosion en rive, expliquerait ce phénomène. Les sédiments érodés en provenance des talus présentent en effet un taux de richesse relativement moins élevé en phosphore que les sédiments provenant des champs, qui profitent d'apport réguliers d'engrais de ferme et d'engrais minéraux. Ces résultats traduisent ainsi l'importance d'atténuer les processus de ruissellement et d'érosion au champ dans une perspective de réduction tangibles des flux diffus de phosphore. L'atténuation des flux de phosphore détectée aux exutoires des autres ruisseaux du réseau, en réponse à des interventions ciblées sur l'égouttement du parcellaire (Walbridge) et l'introduction des pratiques culturales anti-érosives (La Guerre), témoignent de cet important constat.

La réduction de l'ordre de 17 % des flux de phosphore au ruisseau Walbridge est attribuée en large partie à l'amélioration de l'égouttement des secteurs ciblés du parcellaire où une vulnérabilité au ruissellement de surface et à l'érosion avait été diagnostiquée. La réduction des hauteurs du ruissellement de surface sur les zones de champ les plus *hydro-actives* du bassin versant Intervention s'est ainsi traduite en une atténuation de la charge de P. La détection d'une réduction relativement plus importante des formes assimilables de P traduit ici une influence sur le P en provenance des champs plutôt que de l'érosion en rive. À l'inverse du ruisseau Fourchette, l'absence de réponse significative des flux de sédiments aux interventions hydro-agricoles au bassin Walbridge témoigne du meilleur état initial de ses rives. Le bassin versant Intervention du ruisseau Walbridge a ainsi fait l'objet de peu d'interventions à l'égard de foyers d'érosion en rive,

alors que les bassins La Guerre et Fourchette ont profité d'aménagements systématiques de leurs rives de cours d'eau. En pratique, retenons que l'atténuation des foyers d'érosion ne se traduit donc pas nécessairement en réduction tangible des exportations de P (bassin Fourchette). Réciproquement l'atténuation des exportations de P n'est pas nécessairement associée à une réduction proportionnelle des exportations de sédiments, comme c'est le cas pour le ruisseau Walbridge dans le cadre de la présente étude. .

Un autre important constat à portée opérationnelle qui se dégage du suivi de qualité de l'eau des six bassins versants concerne les limites des statistiques pertinentes à l'utilisation du sol et du bilan des apports de phosphore à traduire, à eux seuls, la vulnérabilité du territoire agricole aux exportations diffuses de phosphore. Pour les trois paires de bassins versants jumeaux à l'étude, les propriétés du paysage ont joué un rôle déterminant dans la mobilité des sédiments et des nutriments. Les bassins occupant des élévations relativement plus basses dans le relief que leur jumeau respectif ont tous démontré des taux d'exportation diffuse de sédiments ou de nutriments plus élevés, selon un gradient parfois opposé à l'occupation agricole des sols (Fourchette) ou au bilan des apports en P (Walbridge). Ce constat milite pour la prise en compte de l'*hydro-activité* du territoire au premier plan dans la planification d'actions agroenvironnementales

Les réductions les plus tangibles des exportations de sédiments et de nutriments mises en relief dans le cadre du réseau d'étude sont associées aux actions agroenvironnementales réalisées dans le bassin versant Intervention de la rivière La Guerre. La comparaison des flux des bassins jumeaux y mettent en relief une réduction des exportations annuelles de sédiments (- 34 %), de phosphore total (- 42 %) et de nitrates (- 29 %) à l'exutoire du bassin Intervention. Globalement, une réponse d'une telle ampleur, en une période relativement courte, est attribuée à un l'effet synergique d'une combinaison d'actions agroenvironnementales incluant l'aménagement hydro-agricole du cours d'eau, des berges et du parcellaire du bassin Intervention, l'introduction de pratiques culturales anti-érosives et de cultures de couverture, la transition à des épandages réalisés en période de croissance des cultures, l'ajustement approprié de la fertilisation des cultures, et enfin la régulation des pompages à l'embouchure de la rivière La Guerre. Une implication pratique du volet d'étude sur les bassins La Guerre est toute l'importance à accorder à la complémentarité de ces lignes de défense au plan agroenvironnemental dans la perspective d'obtenir des résultats tangibles sur la qualité de l'eau.

En terminant, soulignons qu'en prime aux enseignements techniques et scientifiques, les principales leçons apprises de cette vaste expérience se mesurent bel et bien à l'échelle humaine. L'investissement unanime des producteurs agricoles dans l'aménagement de leurs terres et leurs ruisseaux témoigne d'une responsabilisation et d'un solide engagement à l'égard des enjeux environnementaux. Cette implication s'inscrit de façon bien concrète dans l'axe du développement durable, où «la pensée globale et l'agir local» prennent tout leur sens.

Tableau 22. Bilan hydrique et flux spécifiques de sédiments et de nutriments estimés aux exutoires des bassins versants Témoin et Intervention du ruisseau Fourchette, du ruisseau Walbridge et de la rivière La Guerre en période de référence (2001-2003) et en période d'évaluation (2004-2006).

Bassins	Période	Bilan hydrique		Flux exporté (moyennes annuelles / superficie du bassin)						
		Précipitation pluie et neige (mm)	Lame d'eau exportée (mm)	Matière en suspension (kg /ha)	Phosphore total (kg /ha)	Phosphore biodisponible (kg /ha)	Phosphore total en solution (kg /ha)	Azote ammoniacal (kg /ha)	Nitrates (kg /ha)	Calcium (kg /ha)
Ruisseau Fourchette										
<i>Témoin</i>	<i>Référence</i>	1 018	639	850	2,35	1,21 (51%)	0,67 (29%)	5,4	20	129
Intervention	Référence	1 018	655	311	1,49	0,95 (64%)	0,79 (53%)	2,5	34	336
<i>Témoin</i>	<i>Évaluation</i>	1 201	845	1 056	2,82	1,4 (50%)	0,83 (29%)	4,6	22	141
Intervention	Évaluation	1 201	729	420	1,89	1,2 (64%)	0,98 (52%)	1,5	25	334
Rivière La Guerre										
<i>Témoin</i>	<i>Référence</i>	950	666	130	0,47	0,20 (43%)	0,12 (27%)	0,4	19	404
Intervention	Référence	950	654	103	0,98	0,65 (66%)	0,62 (63%)	0,9	41	408
<i>Témoin</i>	<i>Évaluation</i>	1 197	644	409	0,96	0,40 (42%)	0,26 (27%)	0,7	14	359
Intervention	Évaluation	1 197	568	215	1,17	0,71 (61%)	0,73 (62%)	0,5	22	342
Ruisseau Walbridge										
<i>Témoin</i>	<i>Référence</i>	978	541	341	0,86	0,43 (51%)	0,21 (25%)	0,6	32	394
Intervention	Référence	978	496	144	0,68	0,38 (55%)	0,28 (42%)	0,6	40	397
<i>Témoin</i>	<i>Évaluation</i>	1 155	590	335	0,94	0,52 (55%)	0,27 (28%)	1,6	25	349
Intervention	Évaluation	1 155	522	167	0,67	0,40 (60%)	0,36 (53%)	0,9	33	360

3 DIFFUSION DES RÉSULTATS

Parallèlement aux rencontres communautaires régulières des propriétaires et partenaires de réalisation du projet, le réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles a fait l'objet de plusieurs activités de communication à caractère scientifique et technique. Le matériel didactique développée en support à ces rencontres d'intervenants du milieu agricole, du grand public et du secteur de la recherche scientifique est disponible sur demande auprès des auteurs du présent rapport.

Soulignons que les artisans de la mise en valeur du bassin versant expérimental de la rivière La Guerre ont reçu deux reconnaissances particulières en 2008 de la part des intervenants régionaux (prix Conscientia) et à l'échelle canadienne (Prix canadiens de l'environnement).

4 HISTOIRE D'UNE RÉUSSITE

Les réalisations du réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles s'inscrivent dans une large coopération scientifique et technique, doublée d'une vaste expérience à l'échelle humaine. Elles sont porteuses de connaissances et de développements technologiques spécifiquement adaptés à l'action collective ciblée sur la mise en valeur des cours d'eau en milieu agricole.

Le volet de suivi de la qualité de l'eau des six bassins versants expérimentaux a permis une meilleure compréhension de l'hydrologie et de la dynamique des transferts diffus de sédiments et de nutriments, depuis la parcelle jusqu'au ruisseau. De nouvelles approches dans la collecte et le traitement des observations de qualité de l'eau ont été développées et validées. L'interprétation du signal géochimique de l'eau de surface aux exutoires des bassins au moyen de sondes multi-paramètres a notamment permis de départager les contributions des drains et du ruissellement de surface au bilan hydrique du bassin versant. Les approches statistiques développées et appliquées au traitement de données de qualité d'eau et de débits des ruisseaux se sont avérées sensibles à la détection de réponses de la qualité de l'eau, malgré d'importantes fluctuations du régime hydrique. Elles ont démontré leur utilité dans l'interprétation des interactions complexes entre les propriétés géophysiques du territoire, la régie du parcellaire, le régime hydrique et les saisons. Validés dans une demi-douzaine de bassins versants expérimentaux présentant des climats, des paysages et des utilisations du sol contrastés, ces outils et protocoles expérimentaux sont transférables auprès d'autres bassins versants en territoire agricole d'envergure similaire. Au plan opérationnel, les résultats du volet d'étude de la qualité de l'eau témoignent de l'absolue nécessité de compléter le prélèvement d'échantillons de qualité de l'eau avec un suivi hydrométrique afin d'en supporter l'interprétation et d'en quantifier les flux. La combinaison de ces observations permet d'associer à chaque tributaire une signature spécifique quant à la réponse de sa qualité de l'eau aux fluctuations du régime hydrique. Ces relations permettent non seulement d'estimer de façon relativement précise les flux de sédiments et de nutriments, mais supportent aussi la détection de gradients spatiaux et temporels dans la qualité de l'eau. Au plan opérationnel, ces résultats témoignent de la faisabilité d'utiliser les flux ou les charges-cibles de sédiments et de nutriments comme critère agroenvironnemental, mieux adapté au processus décisionnel d'actions concertées en bassins versants que les critères de concentration actuellement privilégiés dans le contexte réglementaire québécois. Le recours au dispositif de bassins jumeaux s'est avéré justifié en permettant de détecter des réponses de la qualité de l'eau à des actions concertées à l'échelle du bassin versant, de même qu'en interprétant ces réponses en fonction des saisons et du régime hydrique. De façon plus spécifique à l'égard du phosphore, le volet de suivi de qualité de l'eau du projet a permis de décrire et d'interpréter l'importante variabilité dans la spéciation du phosphore de sources agricoles diffuses. Ces résultats militent pour la prise en compte de la biodisponibilité du phosphore dans la définition des charges-cibles de P et aussi de la saisonnalité de ces apports.

La réalisation du projet dans les trois régions à l'étude s'est accompagnée du développement d'outils de diagnostic et de suivi de l'état des sols et de l'eau de surface spécifiquement adaptés à ce type particulier d'intervention. La planification et la réalisation des aménagements hydro-agricoles à l'échelle des bassins versants Intervention ont en effet profité d'un diagnostic de l'égouttement du parcellaire faisant notamment appel à la télédétection aéroportée et aux modèles numériques d'élévation (MNE) de haute précision. Le volet géomatique de l'étude a tôt fait valoir la complémentarité des images aériennes et de la représentation fine du relief dans le portrait de l'égouttement du parcellaire et des parcours du ruissellement de surface. Le partage convivial de ces

informations avec le support d'atlas électroniques s'est avéré efficace dans la planification concertée des aménagements hydro-agricoles des bassins versants auprès des producteurs et conseillers agricoles, de même qu'auprès des partenaires régionaux en gestion du territoire. Les applications de la géomatique dans le cadre du réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles ont été à la source de plusieurs développements en télédétection dans d'autres régions agricoles par l'équipe de géomatique de l'IRDA, en collaboration avec des partenaires du milieu agricole. Ces projets de recherche-action font valoir aujourd'hui tout le potentiel que présentent les technologies d'acquisition et de traitement géostatistique d'information à référence spatiale dans le diagnostic et la régulation sur mesure des sols, des cultures et de l'eau.

La réalisation du projet s'est associée à trois vastes chantiers d'aménagement hydro-agricoles. De façon bien concrète, les 975 ha en culture des trois bassins Intervention du réseau ont profité d'un aménagement systématique, combinant la plantation et l'entretien de 18 km de bandes riveraines arbustives ou de haies brise-vent, la réfection de 6 km de talus associant travaux mécanisés et bio-génie, de même que l'implantation de 49 structures de contrôle du ruissellement. Ces investissements fournis par les propriétaires, leurs conseillers agricoles, l'équipe de projet de l'IRDA et les différents fonds publics nationaux et régionaux sollicités, ont eu des résultats tangibles sur la qualité de l'eau des ruisseaux dans les trois régions à l'étude. Les retombées environnementales sont d'autant plus importantes où les pratiques agricoles de conservation ont été mises à contribution.

Une implication pratique du réseau d'étude est toute l'importance à accorder à la complémentarité des lignes de défense au plan agroenvironnemental, notamment 1) le contrôle à long terme de l'enrichissement des sols et des modalités d'épandage des engrais de ferme, 2) l'implantation de pratiques culturales anti-érosives, 3) l'aménagement des bandes riveraines et enfin 3) l'égouttement optimal des champs et le contrôle du ruissellement par un drainage de surface et souterrain efficace et sur mesure. En terminant, soulignons qu'en prime aux enseignements techniques et scientifiques, les principales leçons apprises de cette vaste expérience se mesurent bel et bien à l'échelle humaine. L'investissement unanime des producteurs agricoles dans l'aménagement de leurs terres et leurs ruisseaux témoigne d'une responsabilisation et d'un solide engagement à l'égard des enjeux environnementaux.

En raison de l'origine diffuse des sources de contamination en milieu agricole, retenons que le bassin versant constitue l'unité naturelle d'analyse et d'intervention agroenvironnementale. Le constat de la difficile réversibilité des exportations de nutriments de sources agricoles diffuses milite pour des échelles d'intervention d'envergure réaliste et une stratégie préventive dans des bassins versants ciblés. Le contrôle des sources agricoles diffuses de contamination est une entreprise complexe, qui requiert un solide engagement communautaire et d'importantes ressources-conseils et financières. La diversité des intérêts, des responsabilités et des expertises interpellés requiert la formation d'une coalition à l'échelle du territoire, motivée par la recherche de consensus sur la finalité et les modalités des interventions. Quel que soit l'enjeu environnemental qui motive l'intervention, ce sont l'engagement et la responsabilisation du milieu, la concertation des intervenants et la complémentarité des encadrements réglementaire, financier et technique de la production qui demeurent les principaux critères de succès. C'est un défi à dimension humaine qui s'inscrit dans l'axe du développement durable, où «la pensée globale et l'agir local» prennent tout leur sens.

5 PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES

Le plan de financement et la conciliation des dépenses pour chaque année budgétaire du projet ont été déposés en complément du présent rapport scientifique.

6 RÉFÉRENCES

Références citées

Deslandes, J., A. Michaud et F. Bonn. 2002. Développement et validation des indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore dans le bassin versant de la rivière aux Brochets, *Agrosol*, Vol. 13 (2) : 111-123. <http://www.irda.qc.ca/publications/1.htm>

Deslandes, J., I. Beaudin, A. Michaud, F. Bonn and C. A. Madramootoo. 2007. Influence of landscape and cropping system on phosphorus mobility within the Pike River watershed of Southwestern Quebec. Model parametrization and validation. *Canadian Water Resources Journal*. 32(1): 21-42.

Duguet, F., A.R. Michaud, J. Deslandes, R. Rivest et R. Lauzier. 2002. Gestion du ruissellement et de l'érosion pour limiter les pertes en phosphore en bassin versant agricole. *Agrosol* 13(2) : 14-148. <http://www.irda.qc.ca/publications/1.htm>

Enright, P. et C.A. Madramootoo. 2004. Phosphorus losses in surface runoff and subsurface drainage waters on two agricultural fields in Quebec. p. 160-170. In R.A. Cooke (ed.) *Drainage VIII - Proceedings of the Eight International Drainage Symposium*. ASAE, St. Joseph, MI, USA.

Environnement Canada. 2003. Archives nationales d'information et de données climatologiques. Données extraites du site internet en 2006: http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html.

Gouvernements du Québec et de l'état du Vermont. 2002. Entente entre le Gouvernement du Québec et le Gouvernement de l'état du Vermont concernant la réduction du phosphore dans la Baie Missisquoi, 5 p. Internet : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/Infuseur/communiquer.asp?no=209>

Greenberg, E.A., L.S. Clesceri and A.D. Eaton. 1992a. Total Suspended Solids Dried at 103-105 oC. Standard method for examination of waste and waster water, 18th edition, pp 2-56.

Greenberg, E.A., L.S. Clesceri and 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.

Hegman, W., D. Wang et X.C. Borer. 1999. Estimation of Lake Champlain basin wide non-point source phosphorus export. Technical report no. 31. Lake Champlain Basin Program publication series.

Institut de recherché et de développement en agroenvironnement (IRDA) et Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des pêcheries du Québec. 2008. Séries de 10 atlas électroniques dans le cadre du plan d'action concerté sur l'agroenvironnement et la cohabitation harmonieuse. IRDA et MAPAQ, Québec.

Institut de recherché et de développement en agroenvironnement (IRDA) et Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des pêcheries du Québec. 2007. Séries de 10 atlas électroniques dans le cadre du plan de mise en valeur de la biodiversité. IRDA et MAPAQ, Québec.

Jamieson, A., C. Madramootoo et P. Enright. 2002. Phosphorus losses in surface and subsurface runoff from a snowmelt event on an agricultural field in Quebec. *Can. Biosystems Eng.* 45: 1.1-1.7.

Martin A., C. Bossé et L. Lamontagne, 2006. Cartes des sols très détaillées du micro-bassin témoin - bassin versant de la Fourchette. Agriculture et agroalimentaire Canada.

Michaud, A.R., R. Lauzier, J. Desjardins et M. Grenier. 2009a. Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et aux Castors dans le cadre du projet la Lisière Verte. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et le Dura-Club. Québec, Québec.

Michaud, A.R., S.-C. Poirier, R. Lauzier, J. Desjardins, M. Grenier et I. St-Laurent. 2009b. Évaluation des exportations de surface et souterraines de phosphore en sol drainé. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et le Dura-Club. Québec, Québec.

Michaud, A.R. et F. Ruyet. 2009. Évaluation des outils de gestions agroenvironnementales à l'échelle de bassin versant dans un cadre opérationnel de service conseil à la ferme dans le cadre du projet la Lisière Verte. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et le Dura-Club. Québec, Québec.

Michaud, A., S. Seydoux, I. Beaudin et C. Gombault. 2008b. Combinaisons de pratiques de gestion bénéfiques et qualité de l'eau : Étude par modélisation hydrologique de deux bassins versants en Montérégie (Québec). Rapport final présenté à Environnement Canada. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA). 87 p. et annexes.

Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beaudet et J. Lagacé. 2009c. ODEP; un Outil de diagnostic des exportations de phosphore. Projet « Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec », réalisé dans le cadre de l'Initiative d'appui aux conseillers agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada. 111 p.

Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C. A. Madramootoo. 2007. SWAT-predicted influence of different landscape and cropping systems alterations on phosphorus mobility within the Pike River watershed of South-western Quebec. 2007. Canadian journal of soil science 87(3): 329-344.

Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2005. Mobilité du phosphore et intervention agroenvironnementale en bassin versant agricole : Étude de cas du Ruisseau au Castor, tributaire de la Rivière aux Brochets, Québec. *Agrosol*, 16(1): 47-59. <http://www.irda.qc.ca/publications/1.htm>

Michaud, A.R., J. Deslandes et J. Desjardins. 2004. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles : ruisseau Walbridge, ruisseau Fourchette et rivière Laguette. Phase I (calibrage) et II (aménagement). Rapport final. Fonds d'action québécois pour le développement durable. 106 pages. <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Rapport%20final.pdf>

Michaud, A.R. et M.R. Laverdière. 2004. Cropping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability. *Can. J. Soil Science* 84(3) : 295-305. Erratum 84 (4): 525.

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.

Sharpley, A.N., W.W. Troeger and S.J. Smith. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *J. Env. Qual.* 20:235-238.

Walker, W.W. 1987. Empirical methods for predicting eutrophication in impoundments. Report 4: Applications manual. Tech. Rep. E-81-9. Prep. For U.S. Army Corps Eng. Waterways experiment station, Vicksburg, MS.

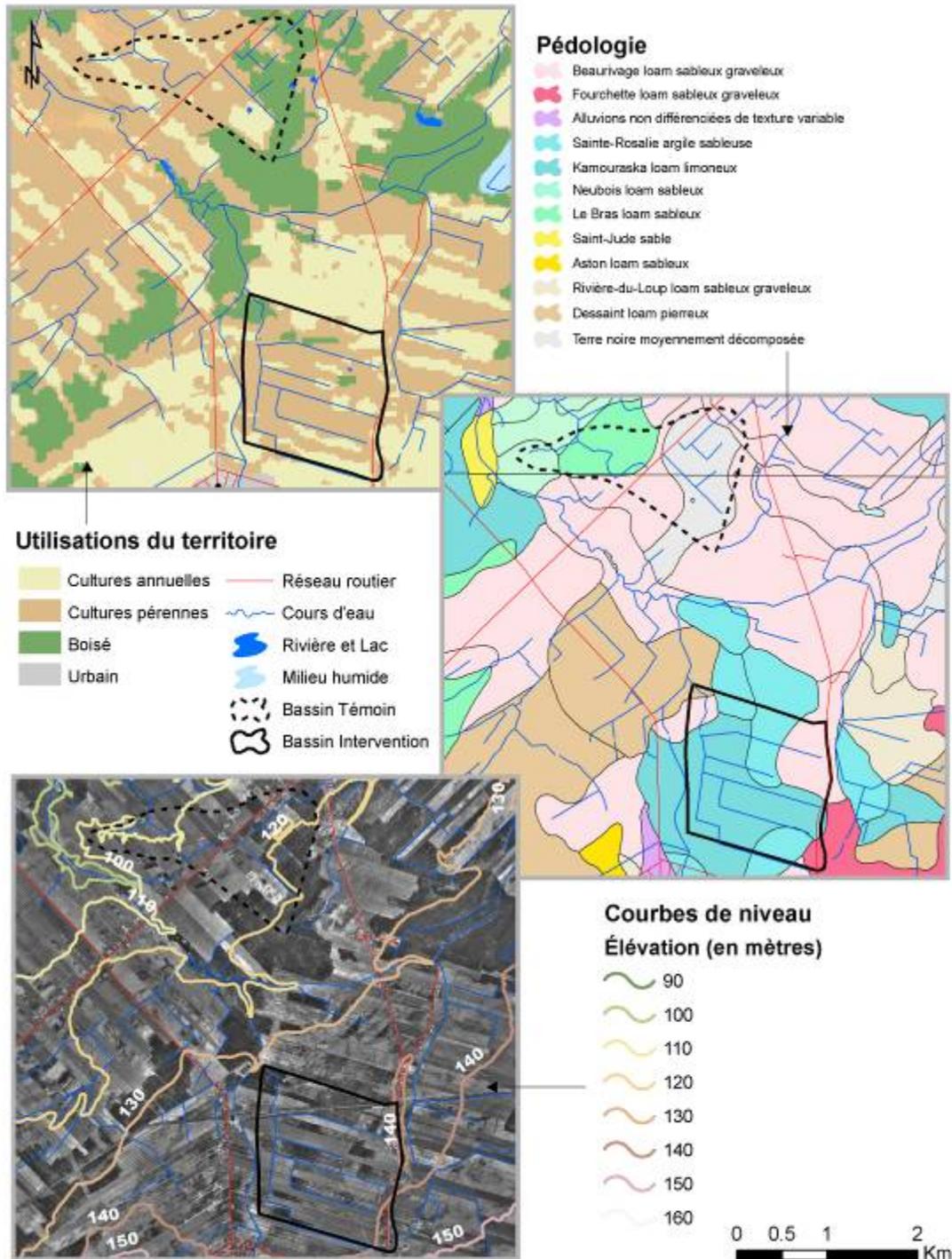
Walker, W. 1998. Flux, Stream loads computations, version 5.0. Environmental laboratory USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi, USA.

Rivest, R. et S. Gosselin. 2002. Mesures de précision du relief pour la gestion du sol et de l'eau. In *Lake Champlain in the new millenium*, 2002 Spring Symposium. Lake Champlain Research Consortium, Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, pp. 46-47.

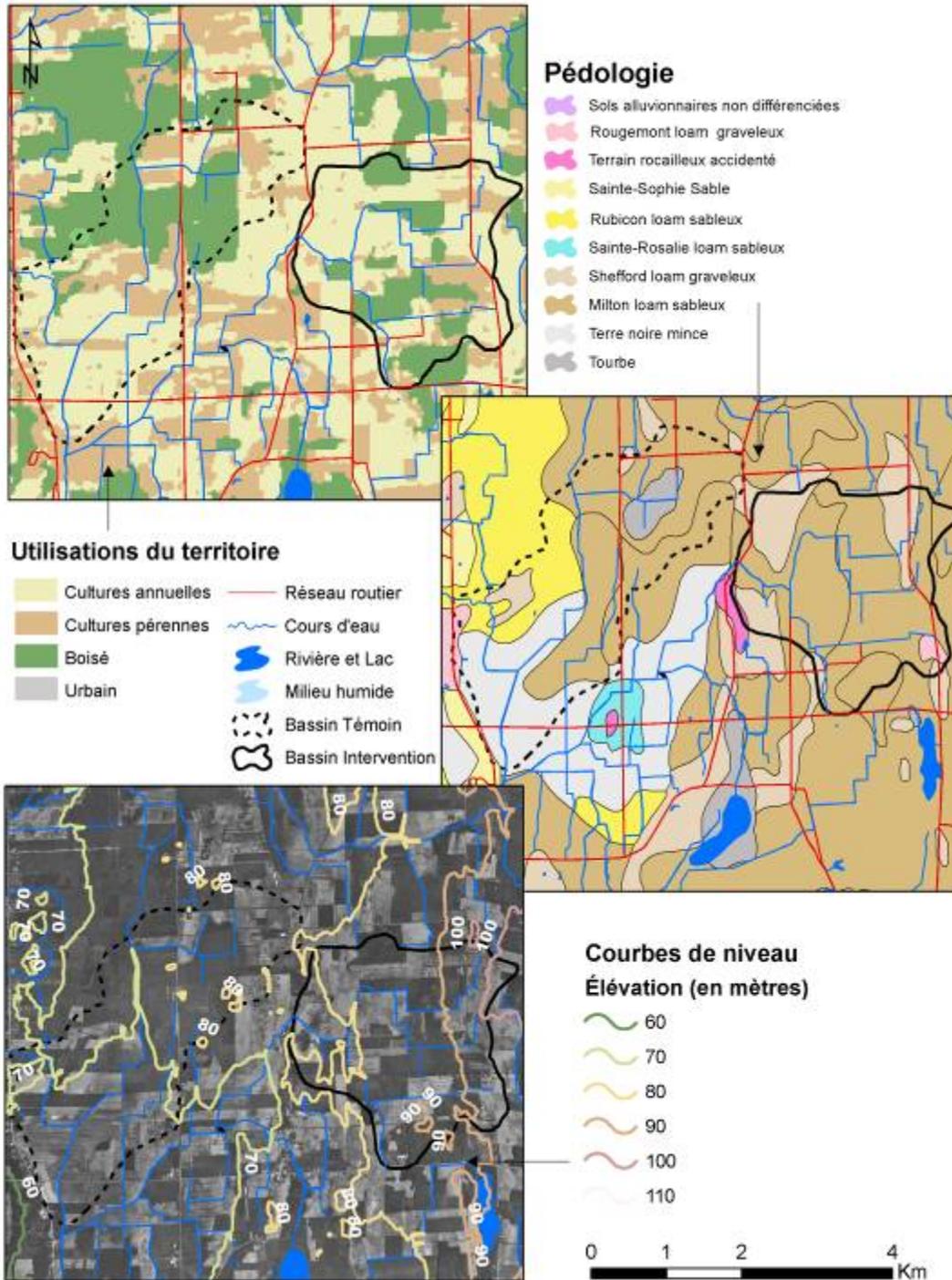
Union des producteurs agricoles (Fédération de l'UPA de Saint-Hyacinthe), IRDA, GéoMont, MAPAQ-Montérégie-Est, COGEBY, Centre de conservation des sols et de l'eau de l'Est du Canada, Université de Sherbrooke. 2007. Diagnostic de l'érosion dans deux bassins versants situés au Québec et au Nouveau-Brunswick et transfert d'expertise technique pour accélérer l'adoption de PGB. Programme de couverture végétale du Canada. Agriculture et agroalimentaire Canada.

ANNEXE I. PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES BIOPHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX

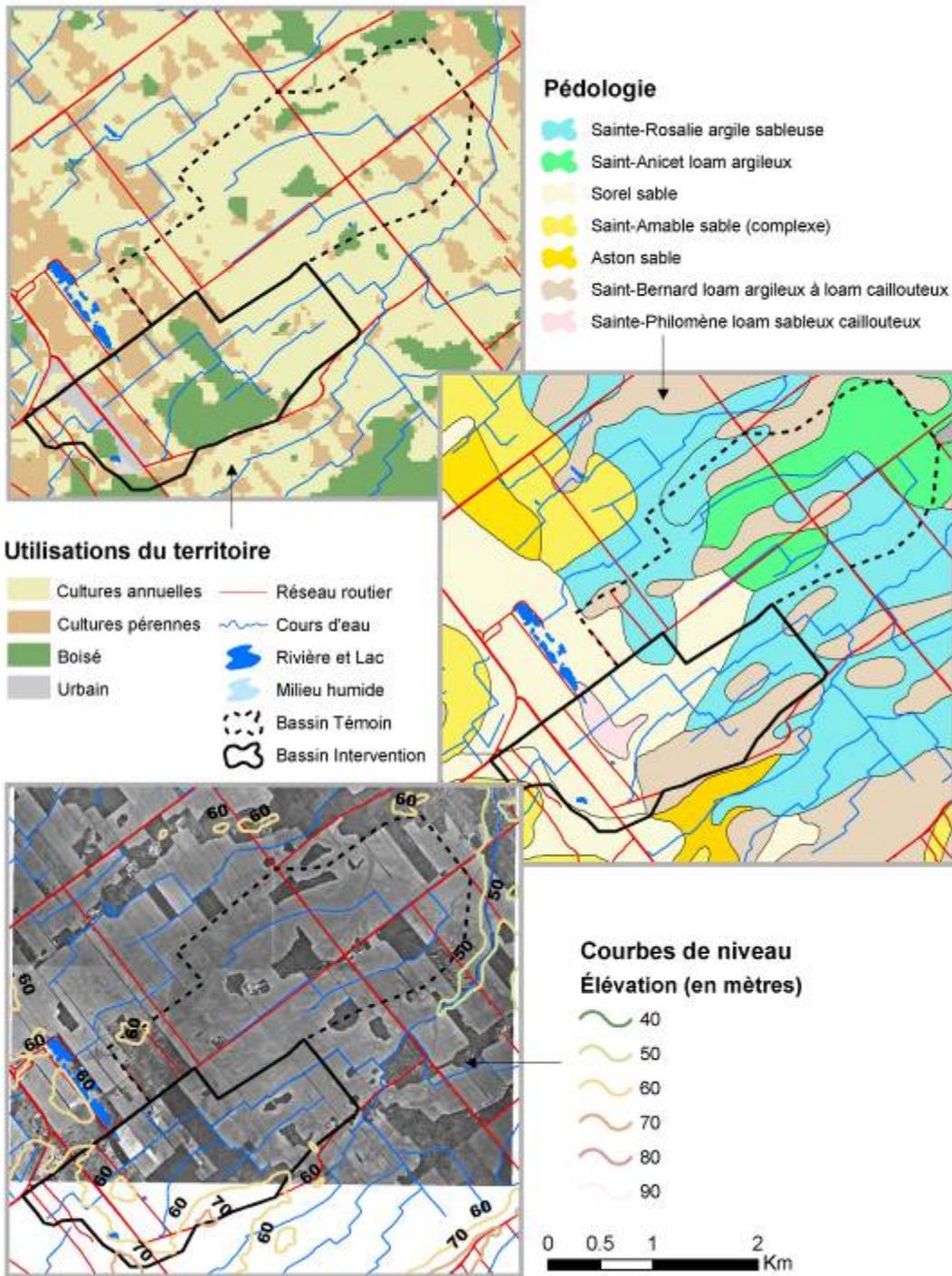
1.1 Principales caractéristiques biophysiques des bassins jumeaux du réseau Fourchette.



1.2 Principales caractéristiques biophysiques des bassins jumeaux du réseau Walbridge.

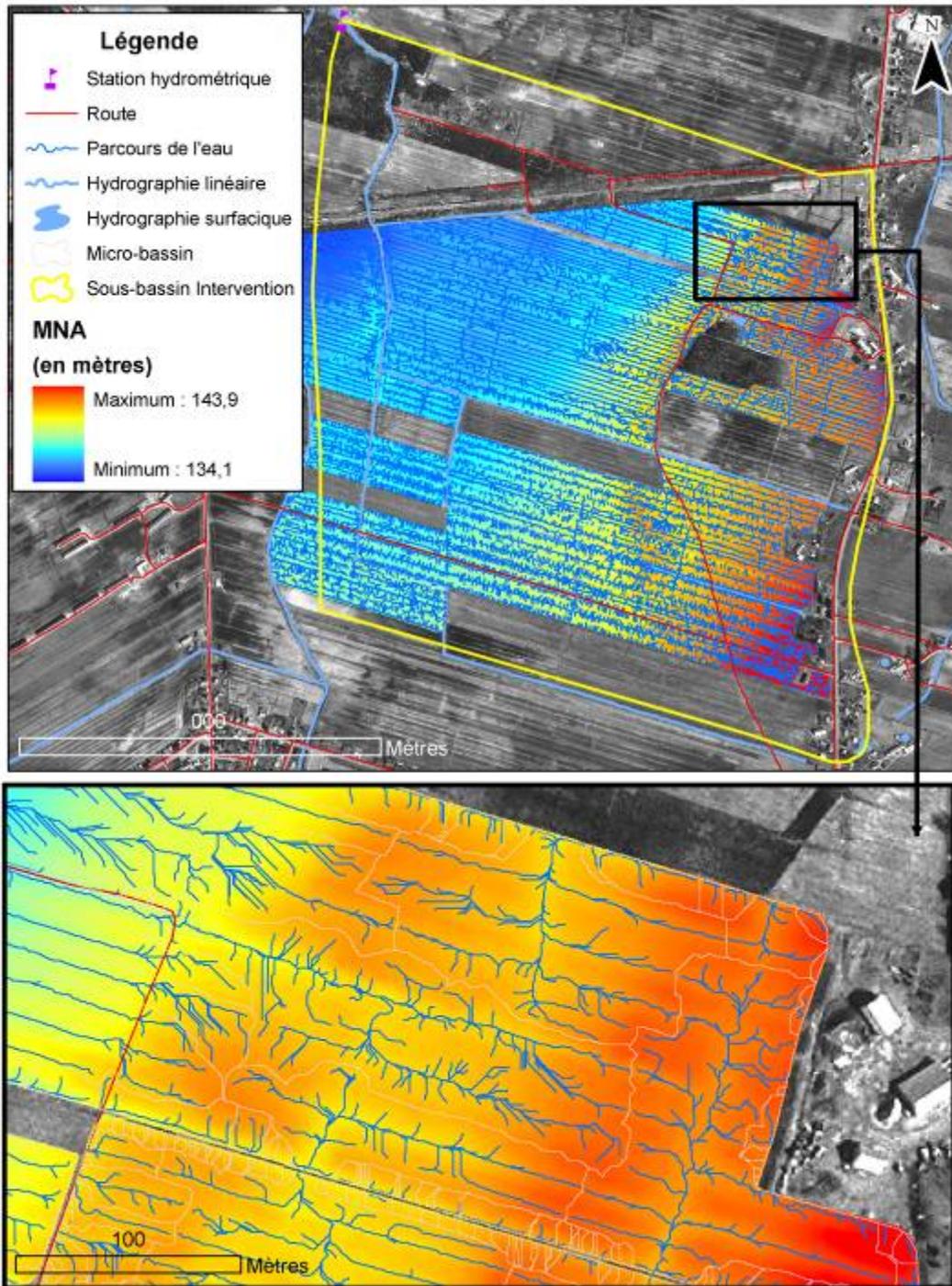


1.3 Principales caractéristiques biophysiques des bassins jumeaux du réseau La Guerre.

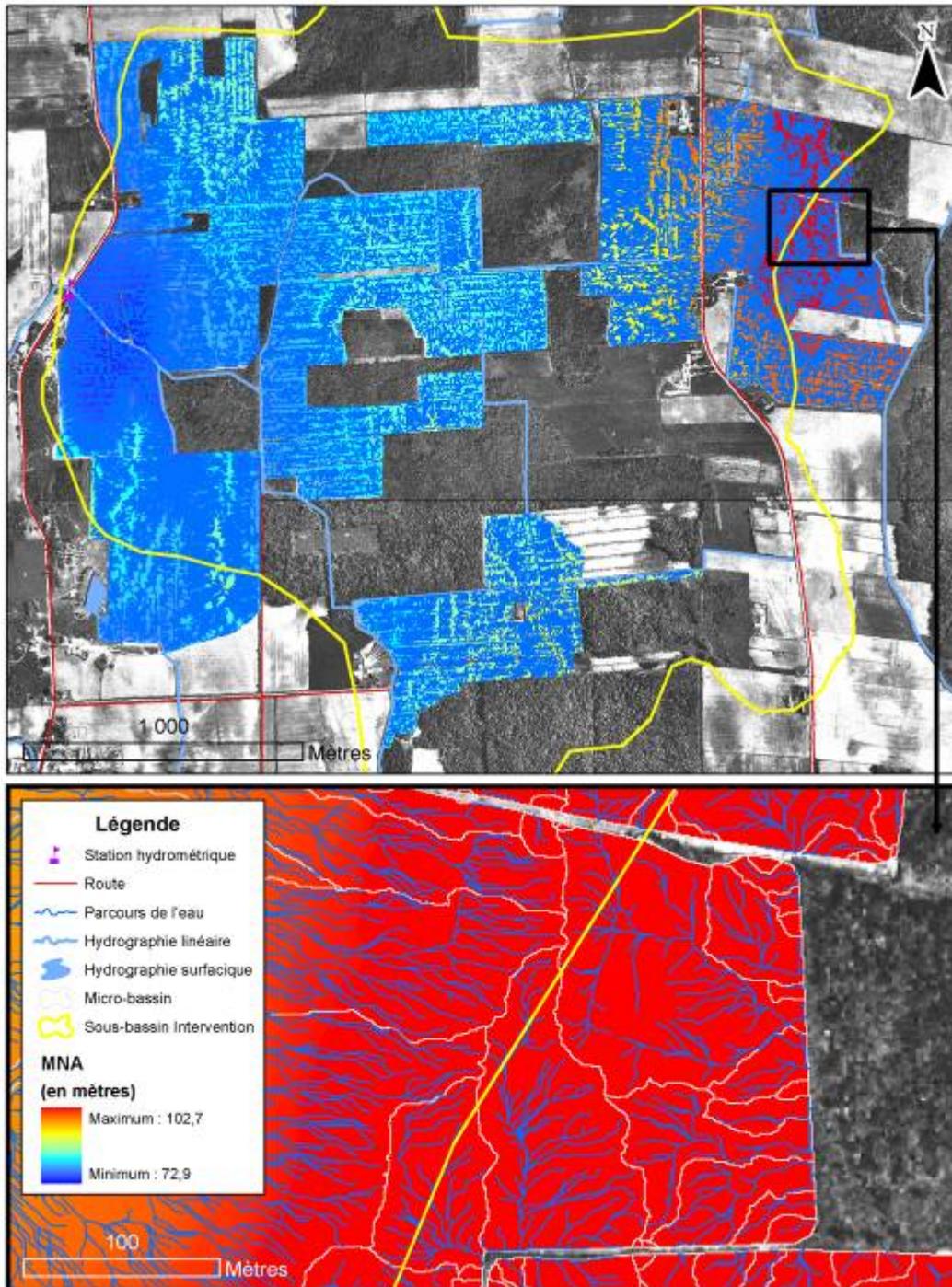


ANNEXE II. MICROTOPOGRAPHIE ET PARCOURS DE L'EAU DES BASSINS INTERVENTION DU RÉSEAU

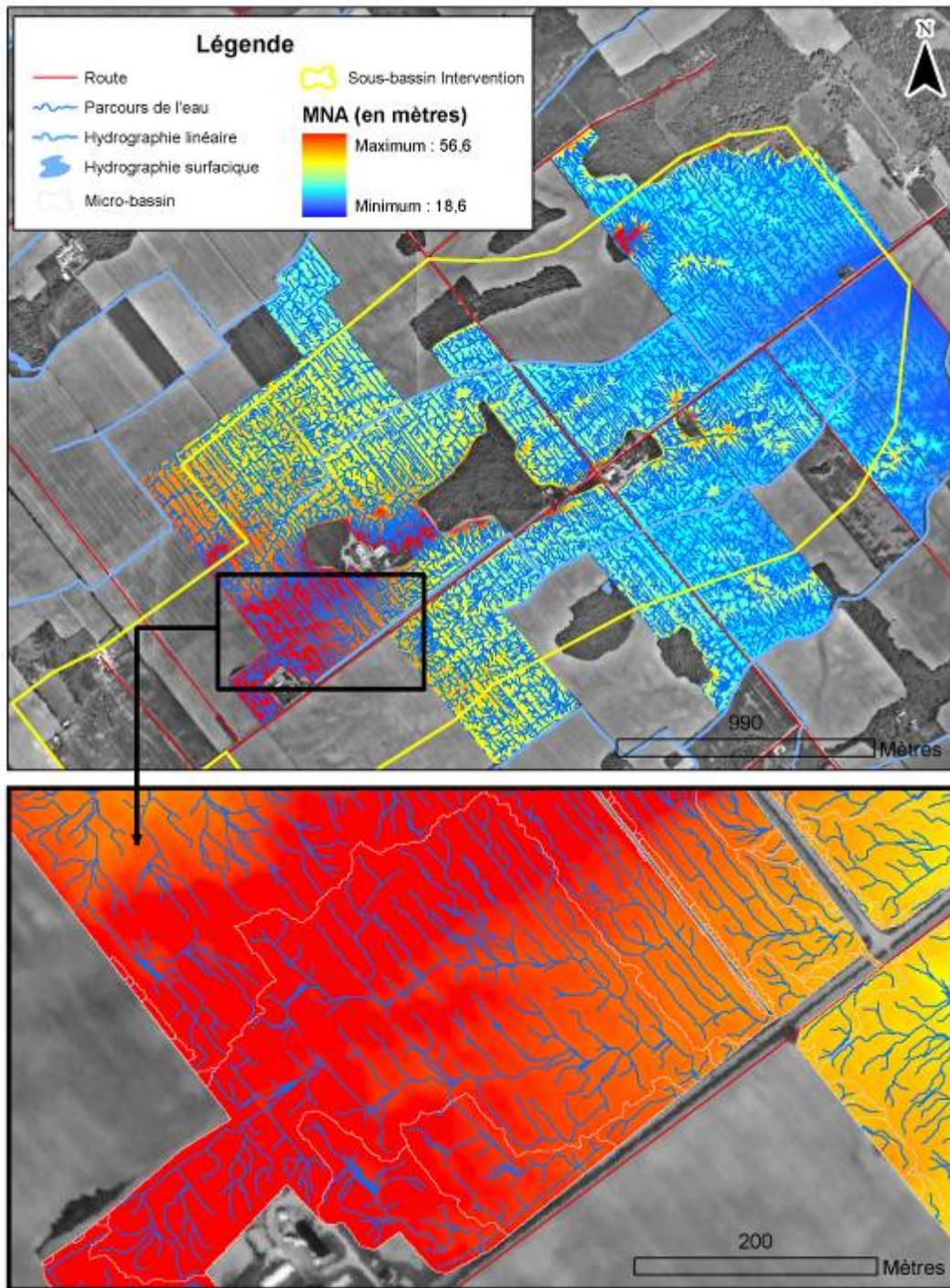
2.1 Microtopographie et parcours de l'eau du bassin *Intervention* du ruisseau Fourchette.



2.2 Microtopographie et parcours de l'eau du bassin *Intervention* du Ruisseau Walbridge.

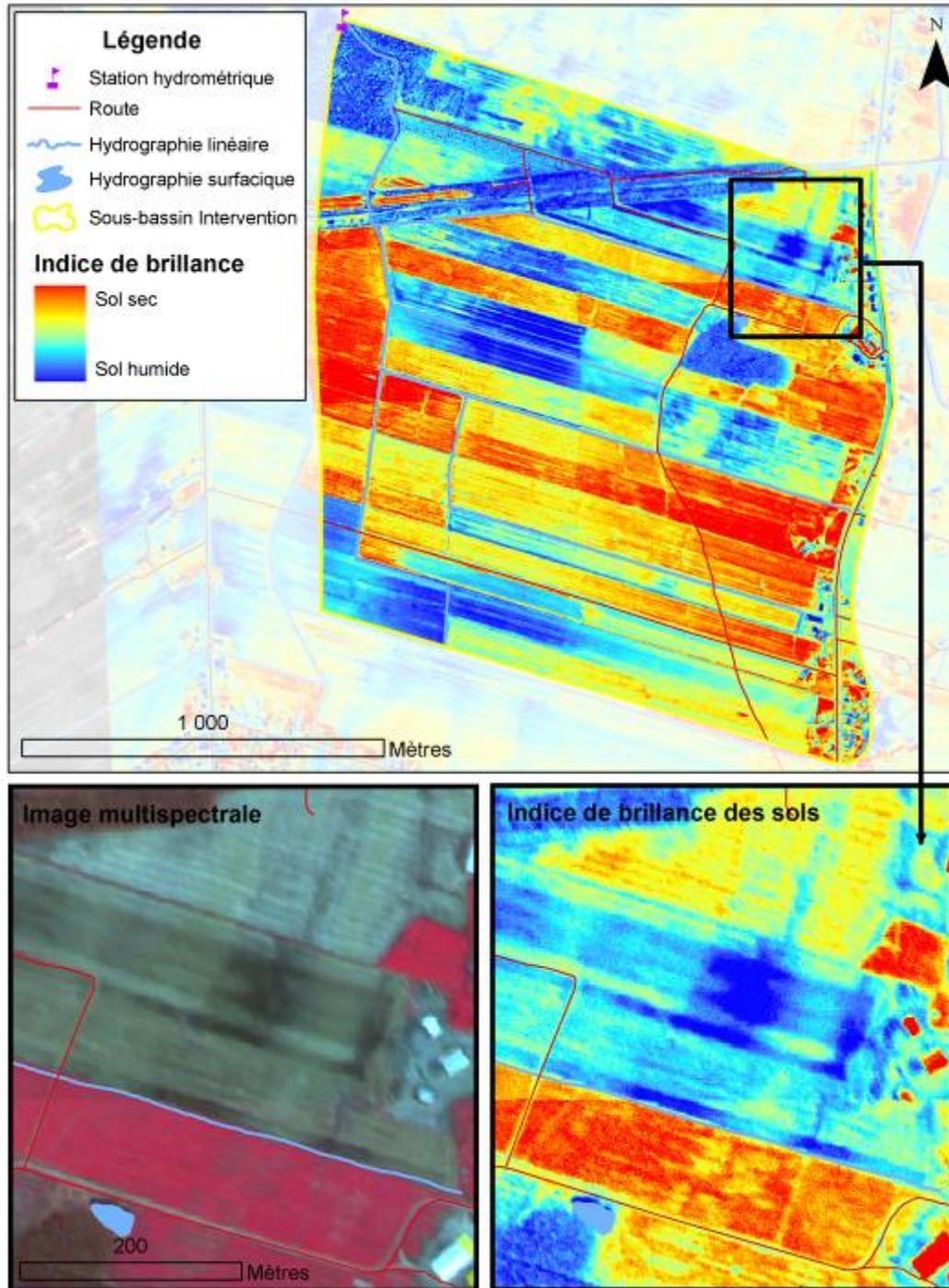


2.3 Microtopographie et parcours de l'eau du bassin *Intervention* de la rivière La Guerre.

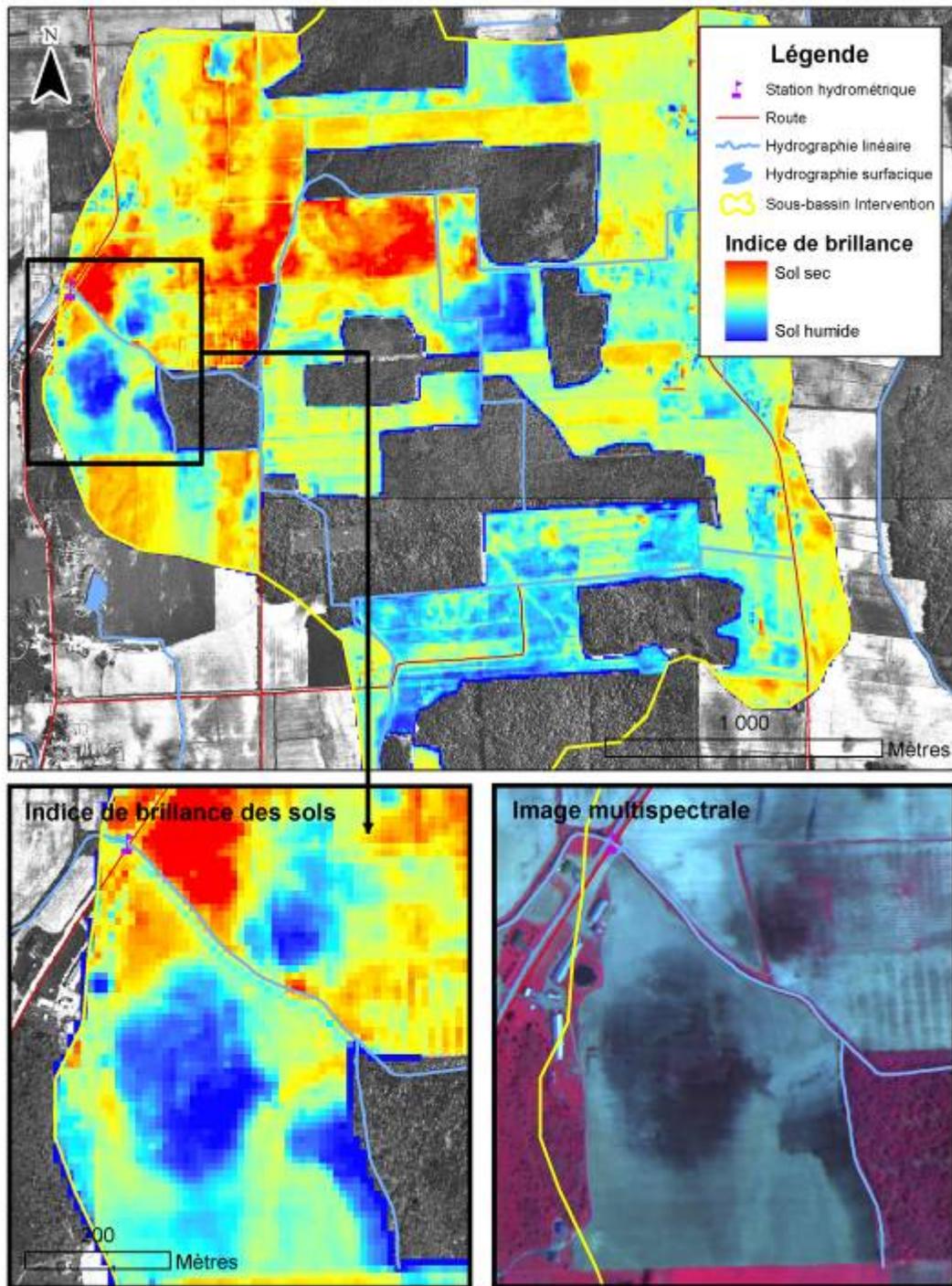


ANNEXE III. INDICE DE BRILLANCE DES SOLS DES BASSINS INTERVENTION DU RÉSEAU DÉRIVÉ DES IMAGES MULTISPECTRALES

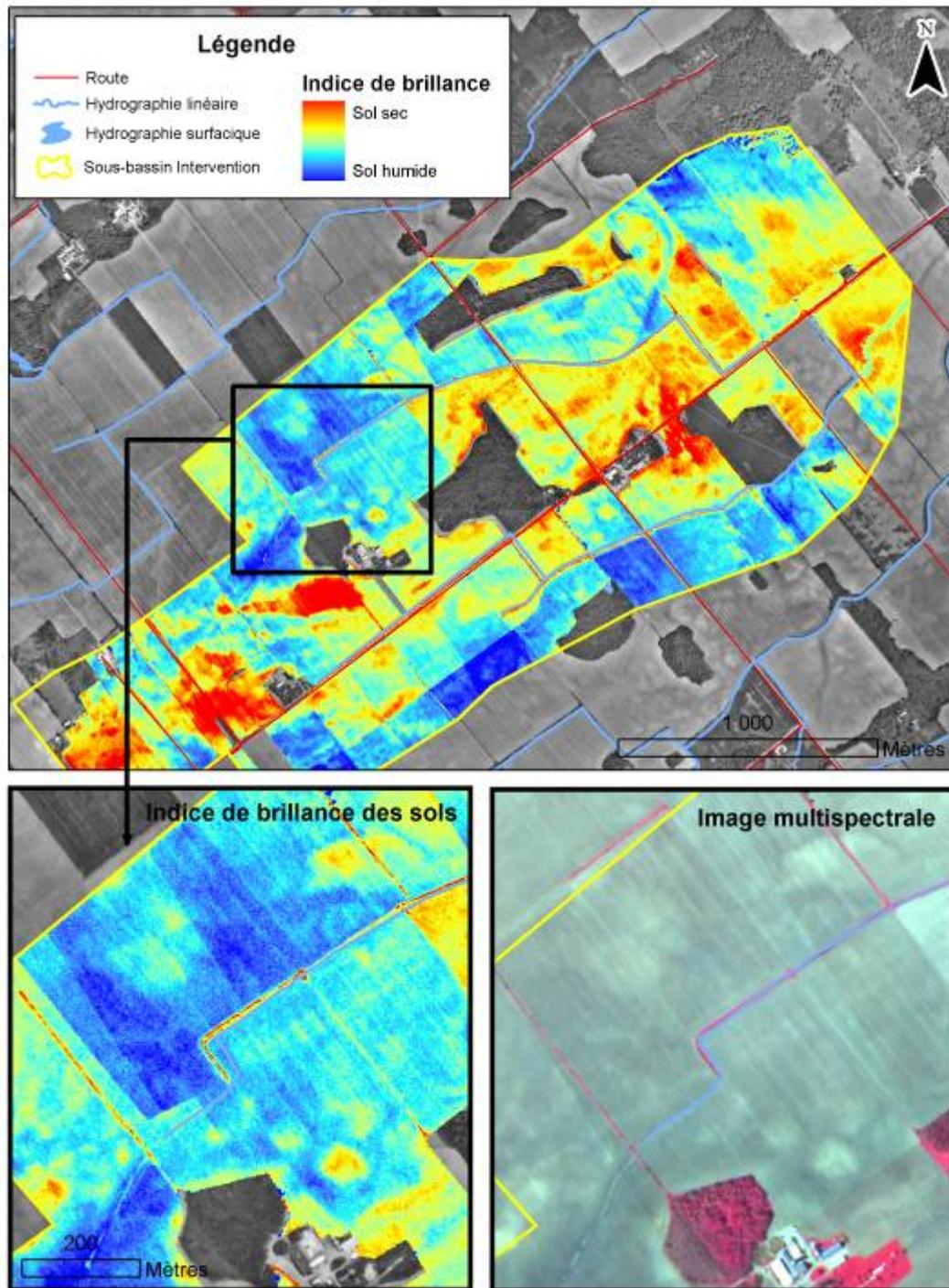
3.1 Indice de brillance des sols du bassin *Intervention* du ruisseau Fourchette.



3.2 Indice de brillance des sols du bassin *Intervention* du ruisseau Walbridge.



3.3 Indice de brillance des sols du bassin *Intervention* de la rivière La Guerre.

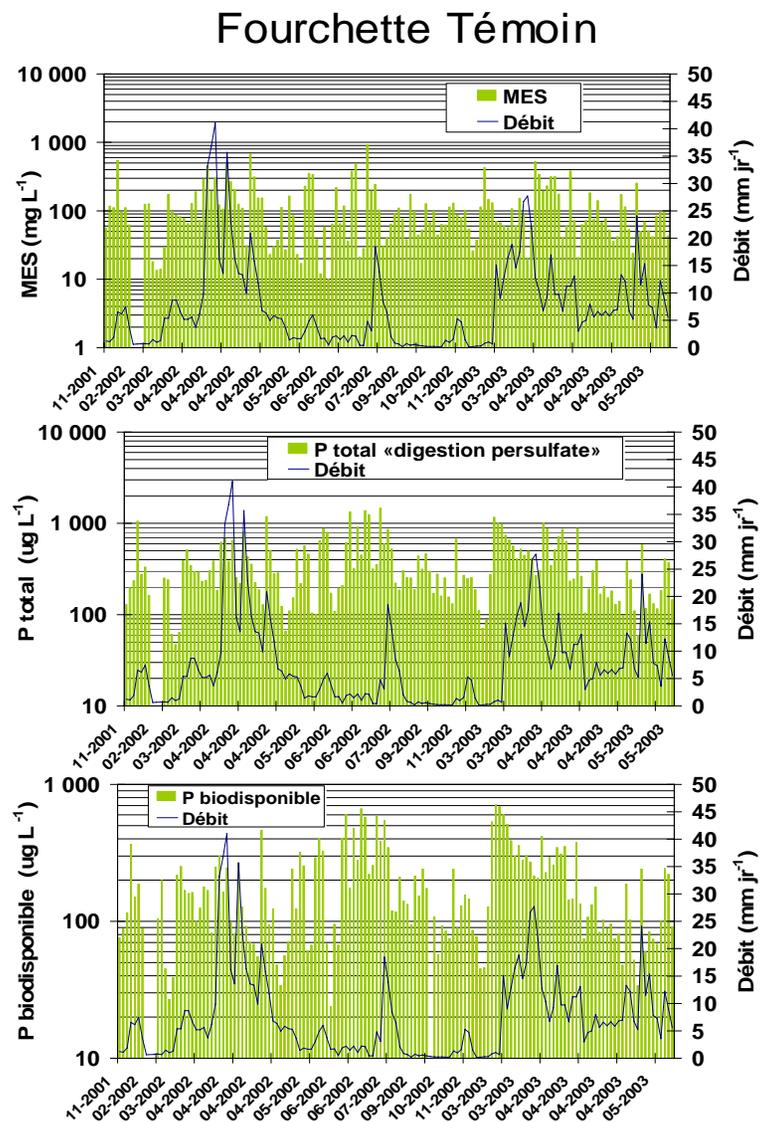
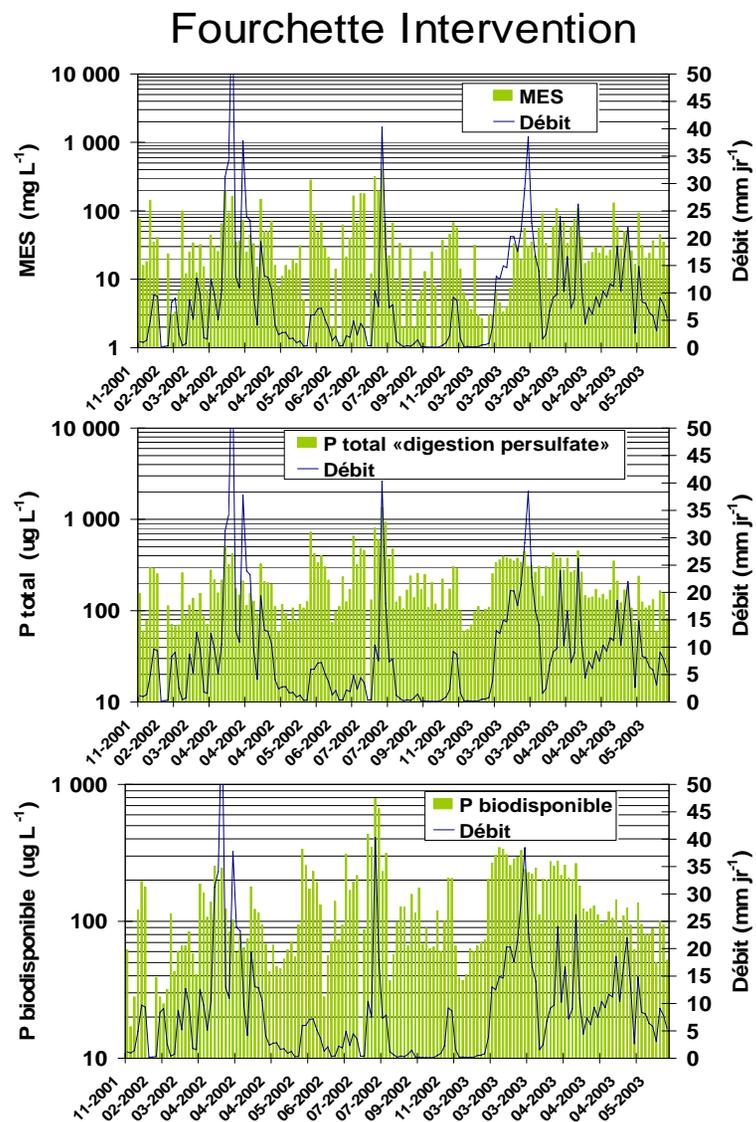


ANNEXE IV. DESCRIPTION DES DONNÉES AGRONOMIQUES COLLIGÉES À L'ÉCHELLE DE LAP PARCELLE POUR LES SIX BASSINS VERSANTS DU RÉSEAU D' ACTIONS CONCERTÉES EN BASSINS VERSANTS AGRICOLES.

DESCRIPTION DES TABLES DE DONNÉES AGRONOMIQUES				
Réseau FAQDD d'actions concertées en bassins versants agricoles				
Codes de type d'entrée:				
I,#	Nombre entier, nb de chiffres ex: 001			
C,#	Caractère, nb de lettres majuscules			
N, #,#	Numérique, nb total de chiffres, nb de décimales			
DATE	aaaa-mm-jj ex: 2002-02-26			
TABLE DES DONNÉES RELATIVES À LA PRODUCTION DES ENGRAIS DE FERME				
Données relevées auprès des gestionnaires d'entreprises				
Paramètre (Nom)	Paramètre (Description)	Type ⁽¹⁾	Unités	Classe (Description)
Entrep.ID	No. Entreprise	I,3		No. identification octroyée par le projet
Fum_ID	No. ID du fumier	I,4		No. Entreprise (I,3) suivi du No. du fumier (I,2)
Fum_Type	Espèce animale	C,8		Codes de la fiche d'enregistrement (productions animales)
Fum_Text	Texture du fumier	C,1		S (Solide) / P (Pâteux) / L (Liquide)
Fum_Orig	Origine du fumier	C,1		F (Produit à la ferme) / I (Importé)
Fum_anal	Disponib. analyse	C,1		O/N (Disponibilité d'analyse récente et représentative)
Fum_N	Dosage N fumier	N, 4,1	kg N/T	Résultat d'analyse(Base humide) ou estimation (Indices agro-environnementaux)
Fum_P	Dosage P fumier	N, 4,1	kg P ₂ O ₅ /T	Résultat d'analyse(Base humide) ou estimation (Indices agro-environnementaux)
Fum_K	Dosage K fumier	N, 4,1	kg K ₂ O/T	Résultat d'analyse(Base humide) ou estimation (Indices agro-environnementaux)
DONNÉES RELATIVES AU SYSTÈME CULTURAL				
Données relevées dans les dossiers des champs				
Paramètre (Nom)	Paramètre (Description)	Type	Unités	Classe (Description)
Entrep_ID	No. Entreprise	I,3		Numéro d'identification octroyée par le projet
Saison_an	Année de la saison de culture	I,2		
Parcelle_ID	No. parcelle	C,6		No. Entreprise (I,3) suivi du no. champ (I,3)
Culture_antec	Culture, saison antécédente			Codes SIMPLIFIÉS (3 lettres max)
Trav_aut_antec	Trav.sol pré-hivernal			NON (Aucun) / LAB (Labour) / DEN (Chisel, outil à dents) / DIS (Pulvériseur, outil à disques)
Epan_aut_antec	Engrais de ferme laissé en surf.			N (Aucun) / I (Incorporé par le travail du sol) / S (surface, 5cm et moins)
Culture_cour	Culture, saison courante	C,8		Codes SIMPLIFIÉS (3 lettres max)
Cult.couv	Cult. Couverture ds saison	C,3		NON (absent) / CRU (Crucifères) / PRA (Gram.et/ou légum. fouragères) / CER (Céréales)
Epan_nb	Nb.épandages dans la saison	I,1		
Epan1_ID	No. ID du fumier, 1er épand.	C,4		Référence à la Table "Engrais de ferme" (No. Entreprise (I2) suivi du No. du fumier (i2))
Epan1_date	Période 1er épandage	Date	an-mo-jr	An-mois-jour (ex:98-05-15)
Epan1_dose	Taux 1er épandage	N,3	T/ha	
Epan1_mod	Mode 1er épandage	C,1		I (Incorporé en 48 hrs) / S (surface, 5cm et moins)
Epan2_ID	No. ID du fumier, 2ième épand.	C,4		Référence à la Table "Engrais de ferme" (No. Entreprise (I2) suivi du No. du fumier (i2))
Epan2_date	Période 1er épandage	Date	an-mo-jr	An-mois-jour (ex:98-05-15)
Epan2_dose	Taux 1er épandage	N,3	T/ha	
Epan2_mod	Mode 1er épandage	C,1		I (Incorporé en 48 hrs) / S (surface, 5cm et moins)
Eng_Nb	Nb.applic.eng.min. saison	I,1		
Eng_date-1		Date	an-mo-jr	An-mois-jour (ex:98-05-15)
Eng_taux-1	Taux appl.1er eng.min-1	N,3	kg/ha	
Eng_form.N-1	Formule N 1er eng.min.	N,2	%	
Eng_form.P-1	Formule P 1er eng.min.	N,2	%	
Eng_form.K-1	Formule K 1er eng.min.	N,2	%	
Eng_date-2		Date	an-mo-jr	An-mois-jour (ex:98-05-15)
Eng_taux-2	Taux appl.2e eng.min	N,3	kg/ha	
Eng_form.N-2	Formule N 2e eng.min.	N,2	%	
Eng_form.P-2	Formule P 2e eng.min.	N,2	%	
Eng_form.K-2	Formule K 2e eng.min.	N,2	%	
Trav_prin1_mode	1er travail du sol au printemps	C,3		NON (Aucun) / LAB (Labour) / DEN (Chisel, outil à dents) / DIS (Pulvériseur, outil à disques)
Trav_prin1_date	Date du 1er trav. au printemps	Date	an-mo-jr	An-mois-jour (ex:98-05-15)
Trav_prin2_mode	2e travail du sol au printemps	C,3		NON (Aucun) / LAB (Labour) / DEN (Chisel, outil à dents) / DIS (Pulvériseur, outil à disques)
Trav_prin2_date	Date du 2e trav. au printemps	Date	an-mo-jr	An-mois-jour (ex:98-05-15)
Trav_prin3_mode	3e travail du sol au printemps	C,3		NON (Aucun) / LAB (Labour) / DEN (Chisel, outil à dents) / DIS (Pulvériseur, outil à disques)
Trav_prin3_date	Date du 3e trav. au printemps	Date	an-mo-jr	An-mois-jour (ex:98-05-15)
Trav_aut1_mode	1er travail du sol d'automne	C,3		NON (Aucun) / LAB (Labour) / DEN (Chisel, outil à dents) / DIS (Pulvériseur, outil à disques)
Trav_aut1_date	Date du 1er trav. d'automne	Date	an-mo-jr	An-mois-jour (ex:98-05-15)
Trav_aut2_mode	2e travail du sol d'automne	C,3		NON (Aucun) / LAB (Labour) / DEN (Chisel, outil à dents) / DIS (Pulvériseur, outil à disques)
Trav_aut2_date	Date du 2e trav. d'automne	Date	an-mo-jr	An-mois-jour (ex:98-05-15)
Résidus_couvert	Estim. Couvert. Résidus cult.	N, 2	%	Estimé selon l'abaque des précédents culturaux et façons culturales
Drain_surf	Amén.drainage surf.	C,1		N (Non amélioré) / C (Planches en pente constante) / B (Planches bombées)
Drain_souter	Amén.drainage souterrain	C,1		N (Absent) / S (Systématique) / P (Partiel)

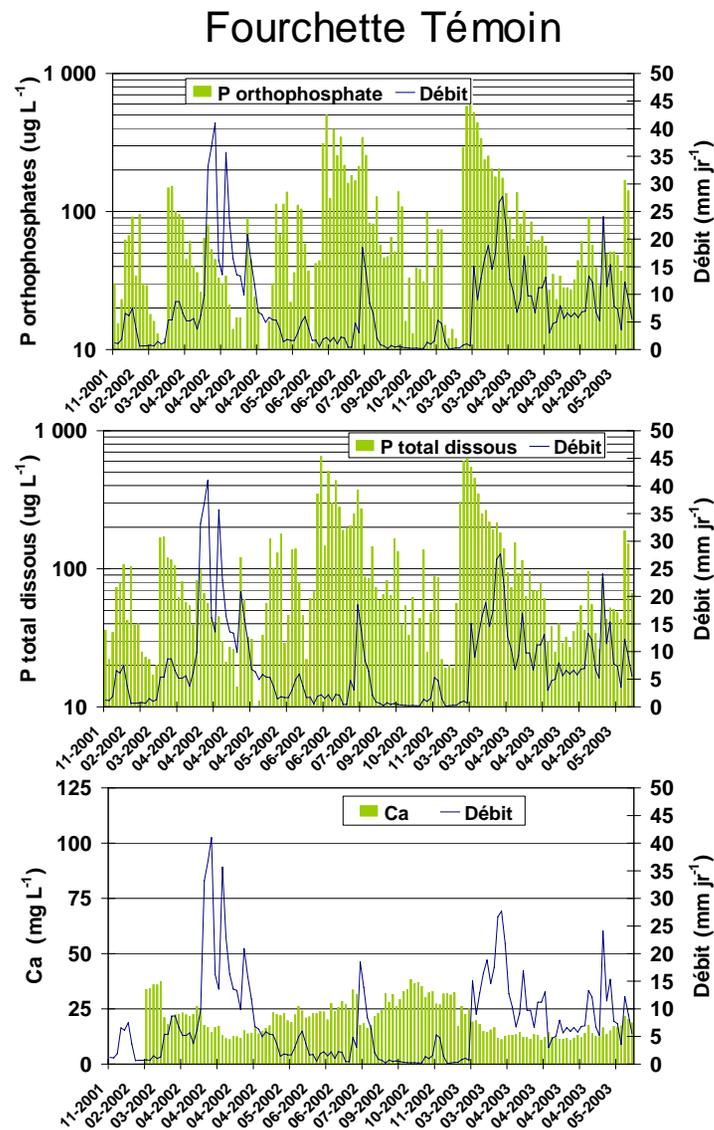
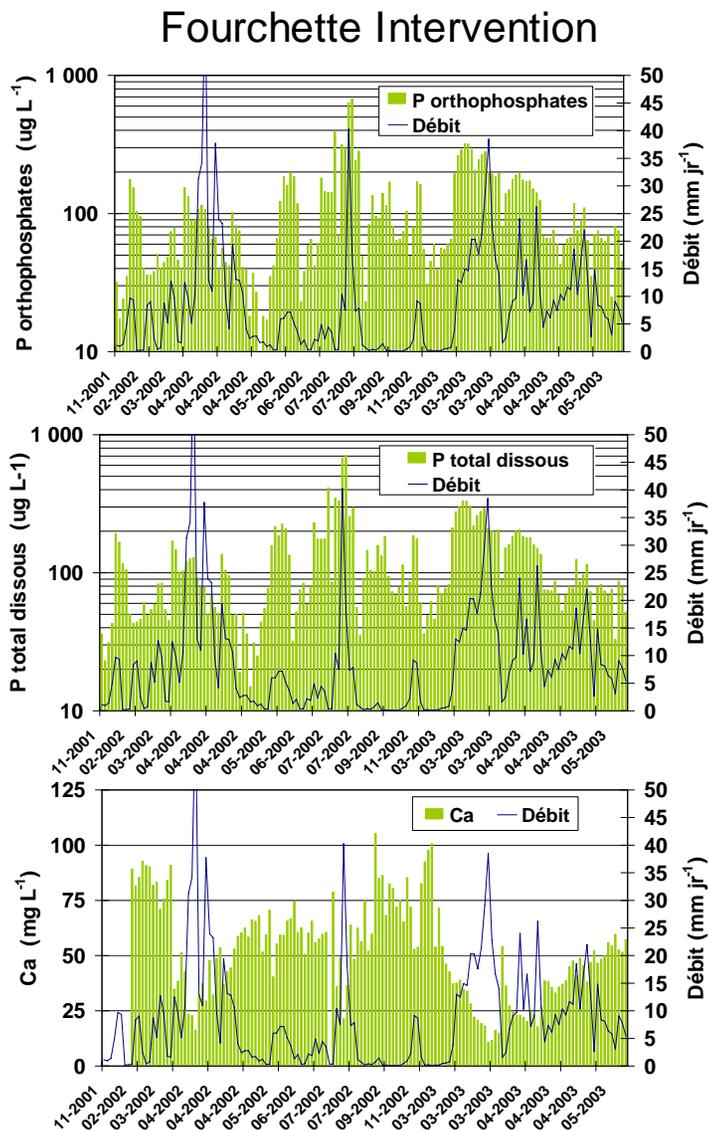
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.1.1 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) des bassins du réseau Fourchette.



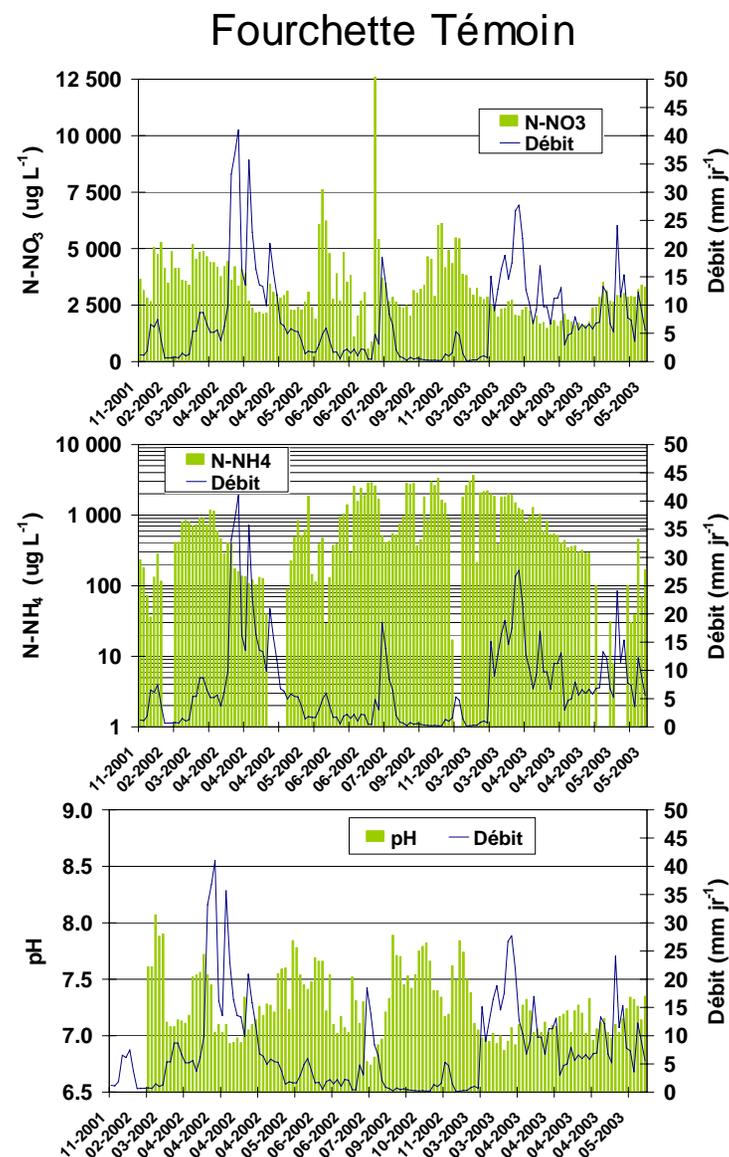
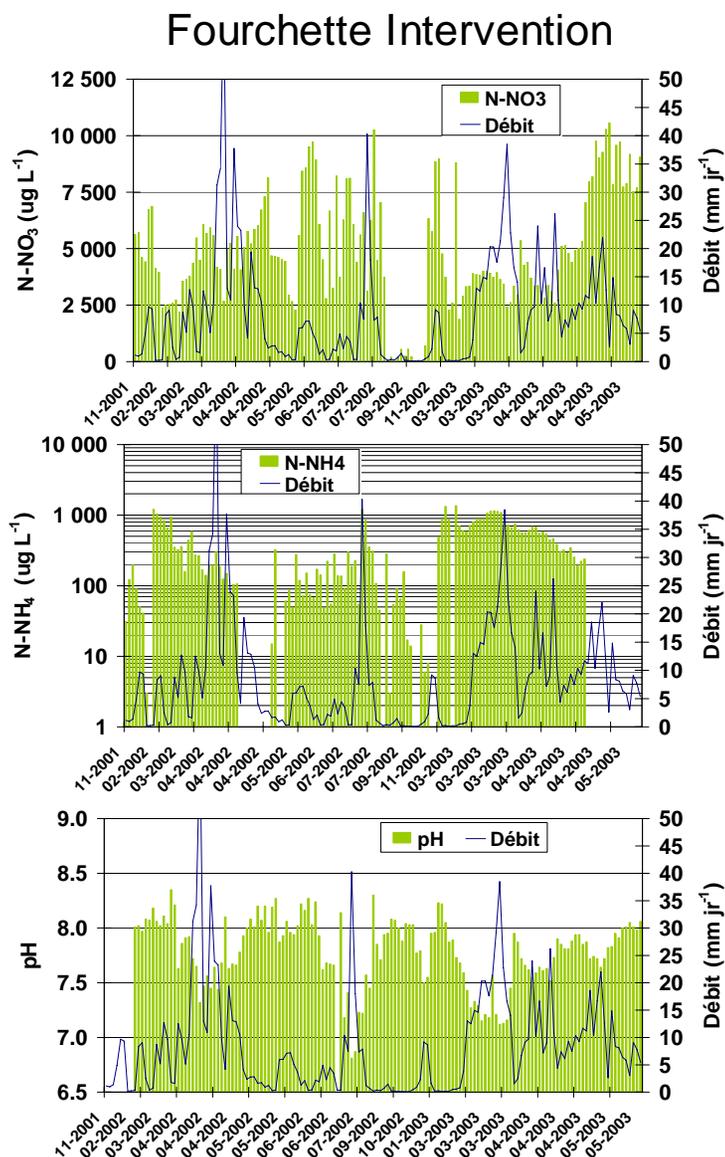
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.1.1 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) des bassins du réseau Fourchette (suite).



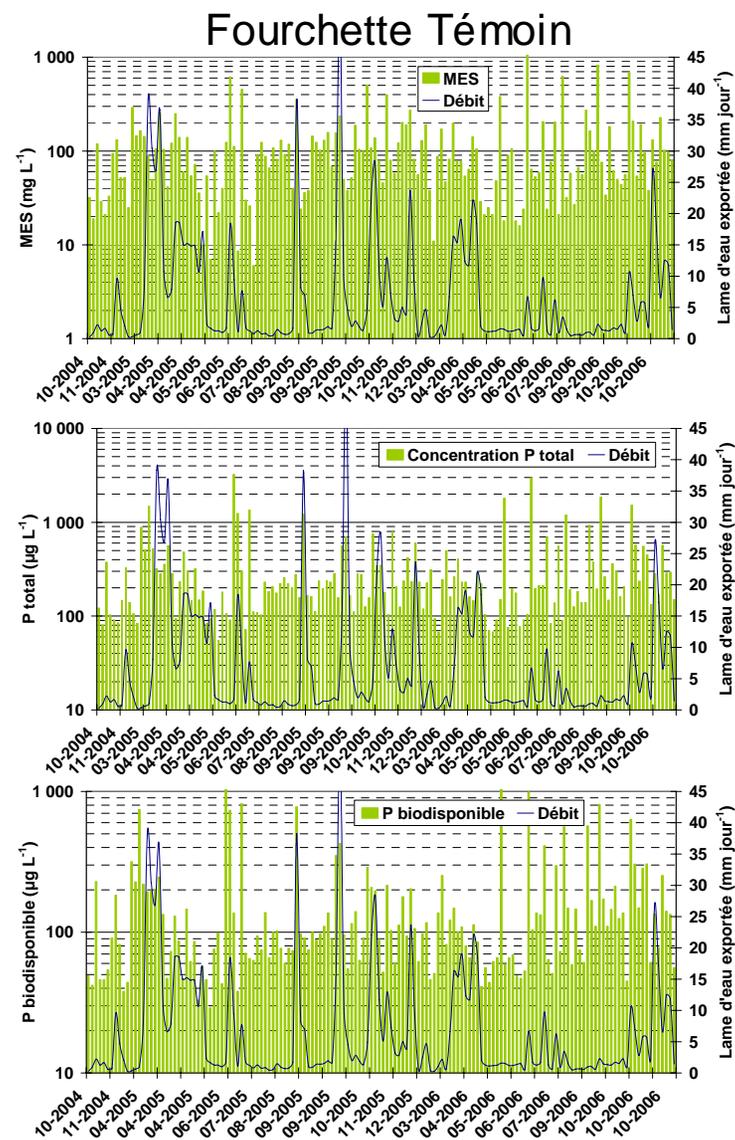
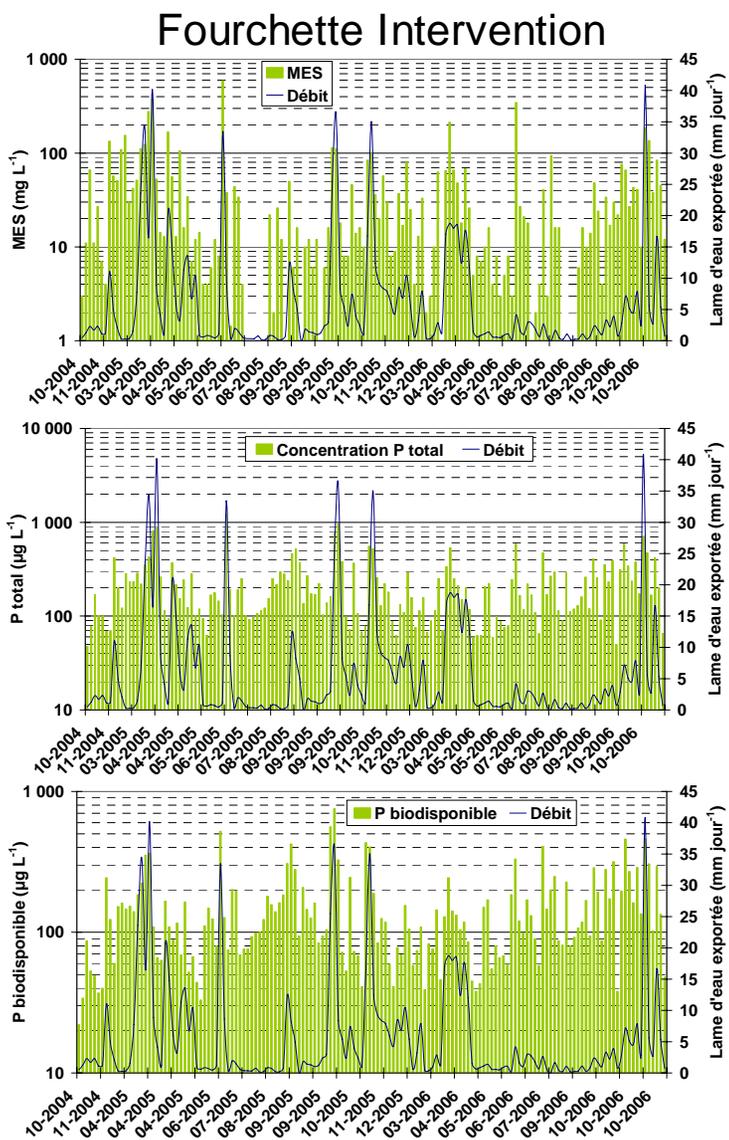
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.1.1 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) des bassins du réseau Fourchette (suite).



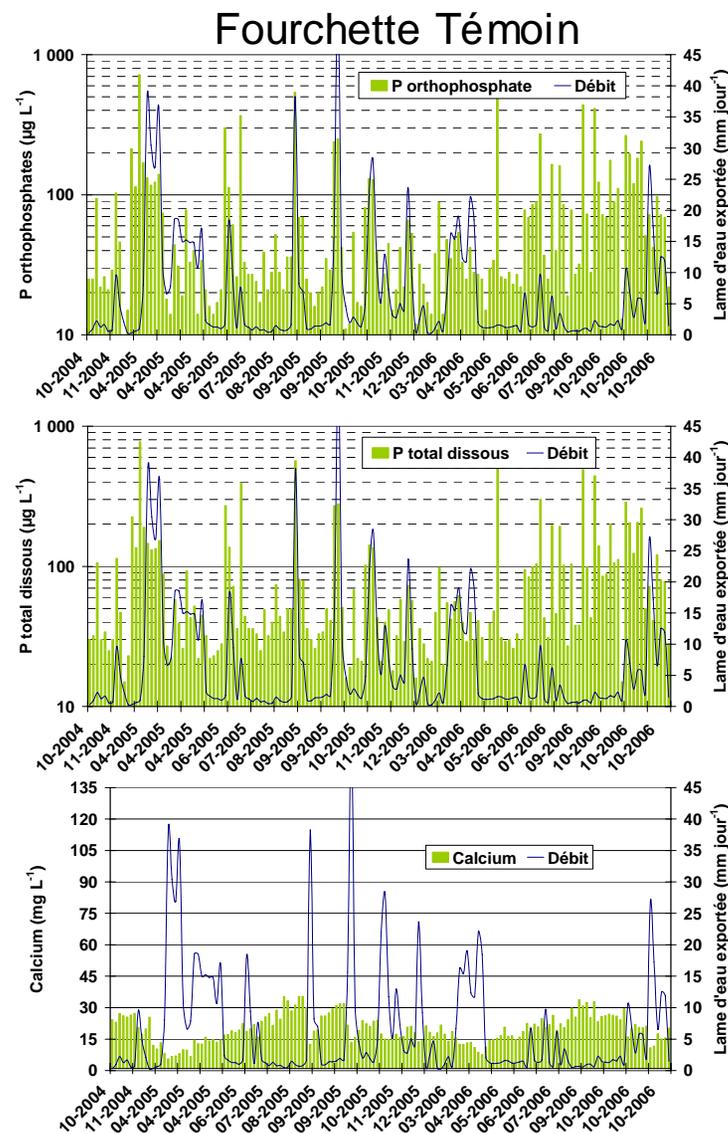
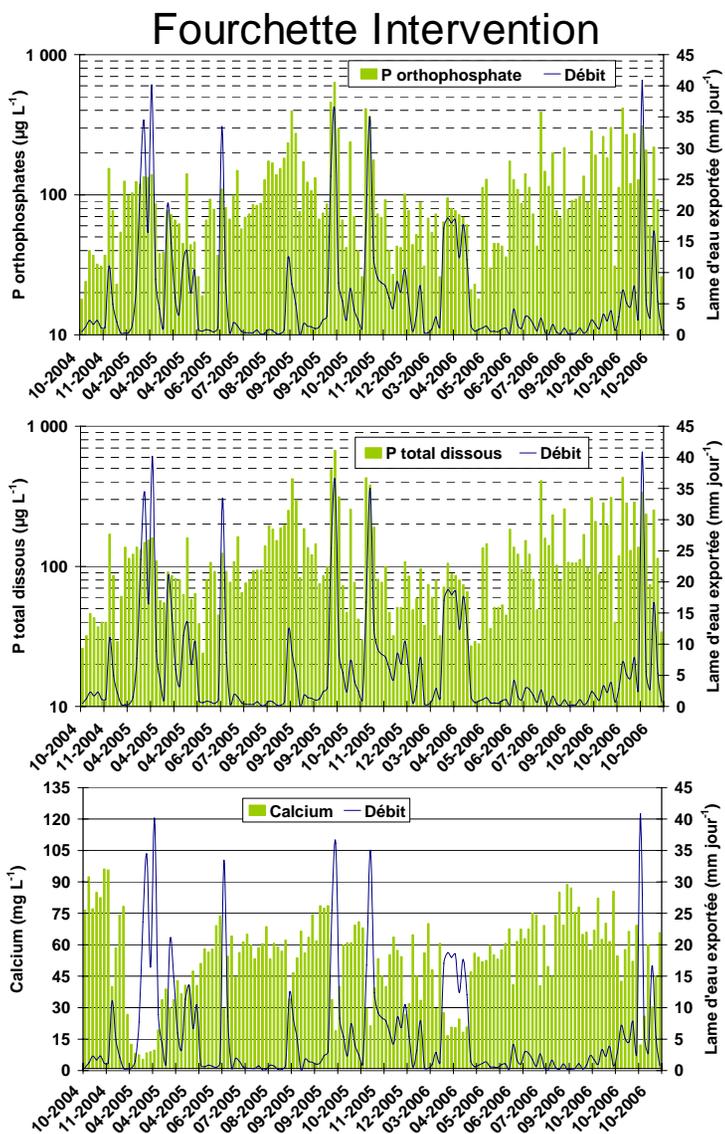
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.1.2 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période d'évaluation (octobre 2004 à décembre 2006) des bassins du réseau Fourchette.



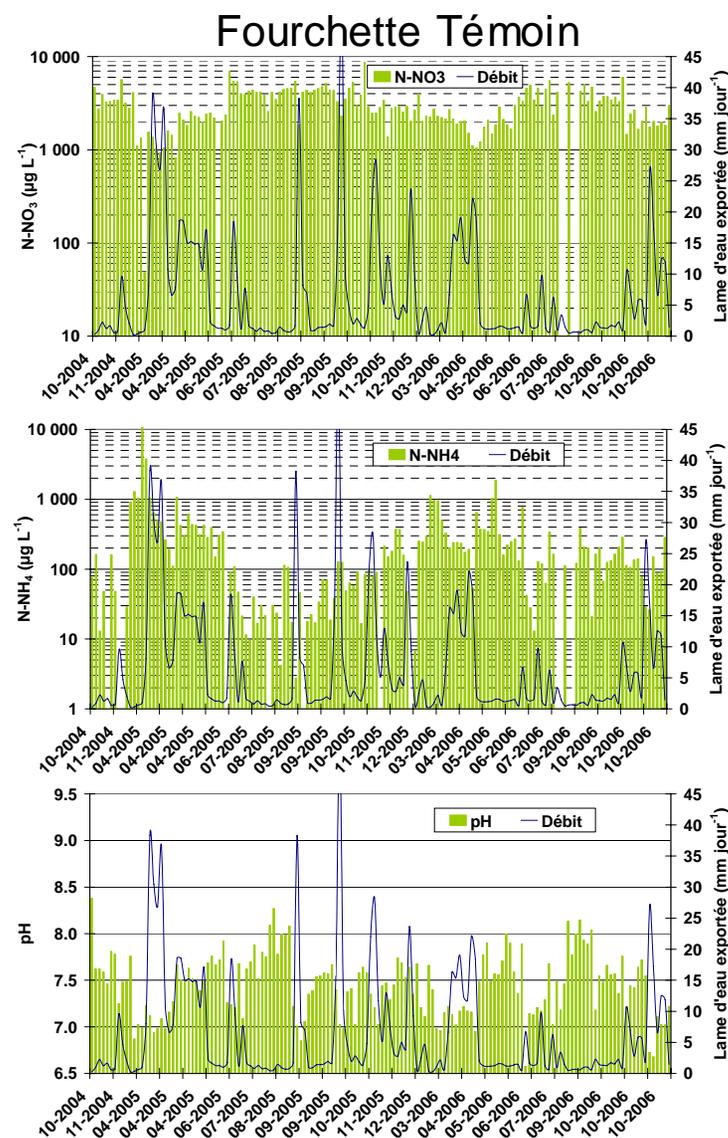
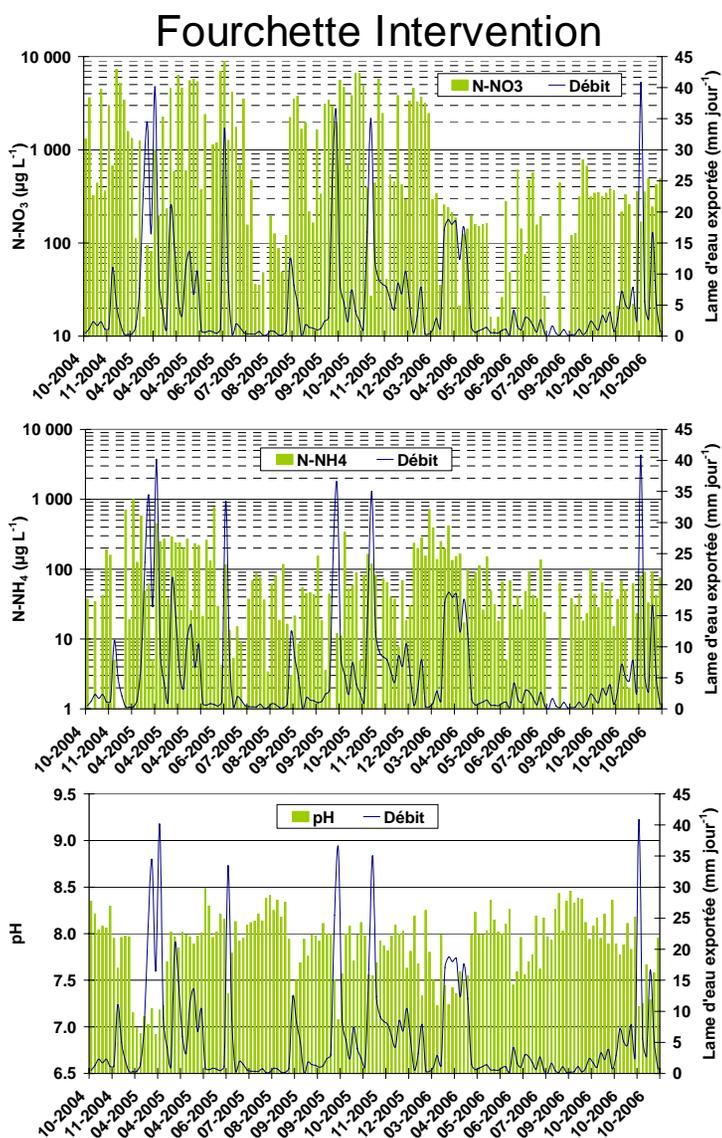
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.1.2 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période d'évaluation (octobre 2004 à décembre 2006) des bassins du réseau Fourchette (suite).



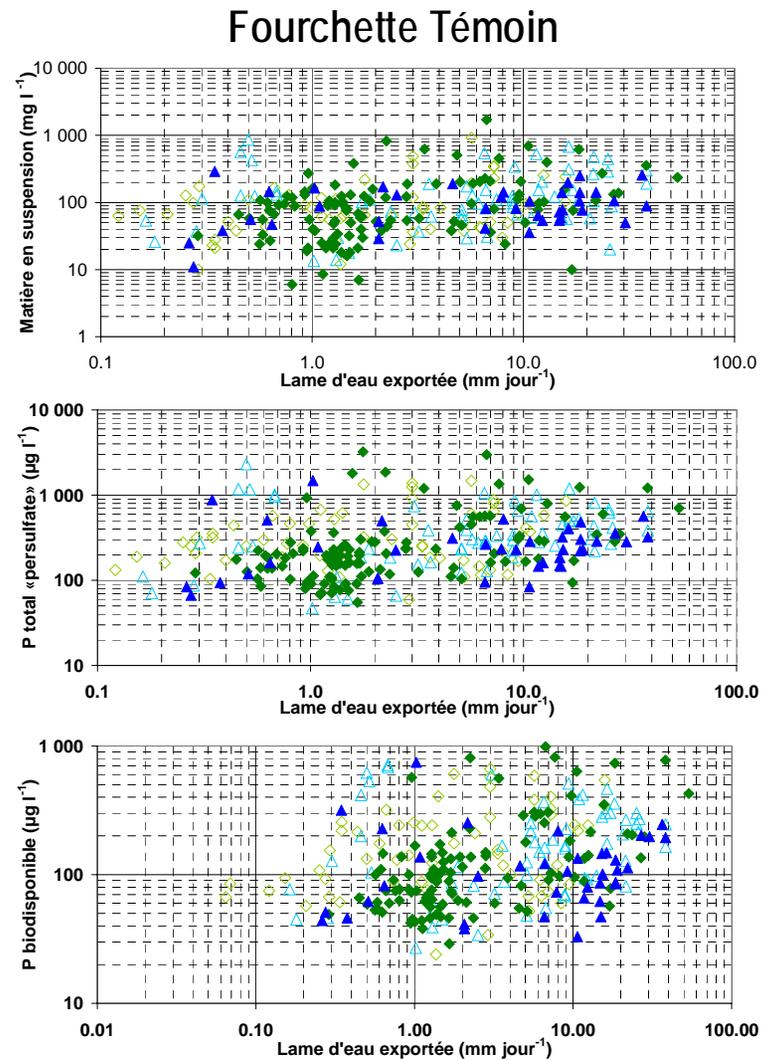
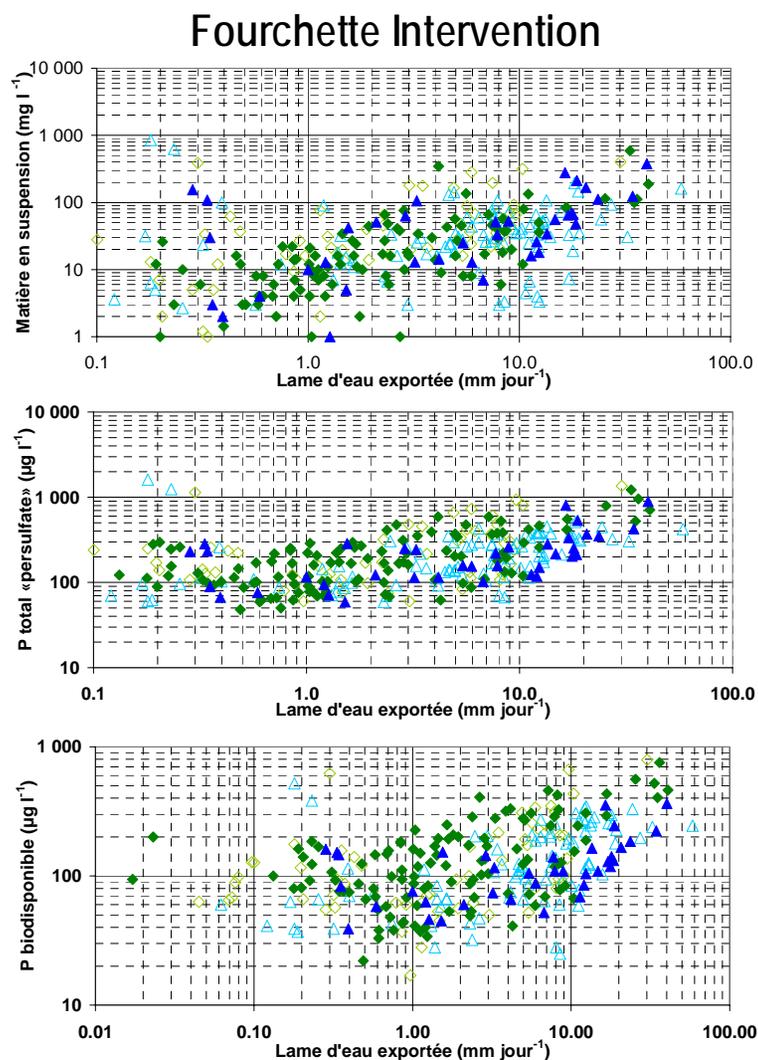
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.1.2 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période d'évaluation (octobre 2004 à décembre 2006) des bassins du réseau Fourchette (suite).



ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

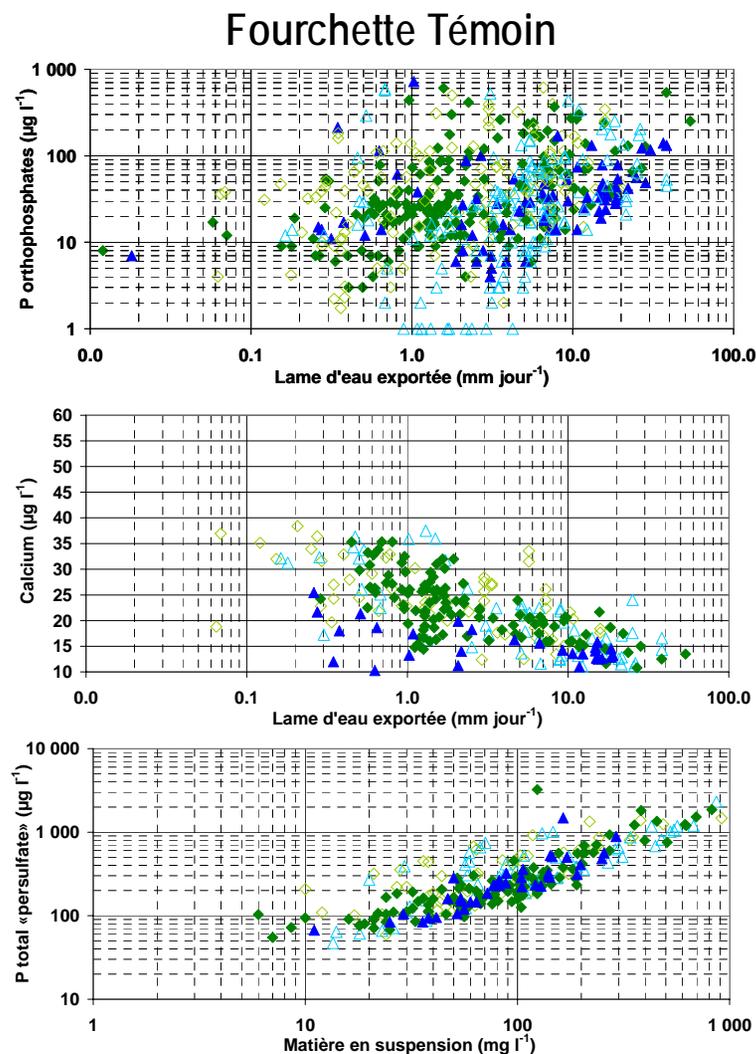
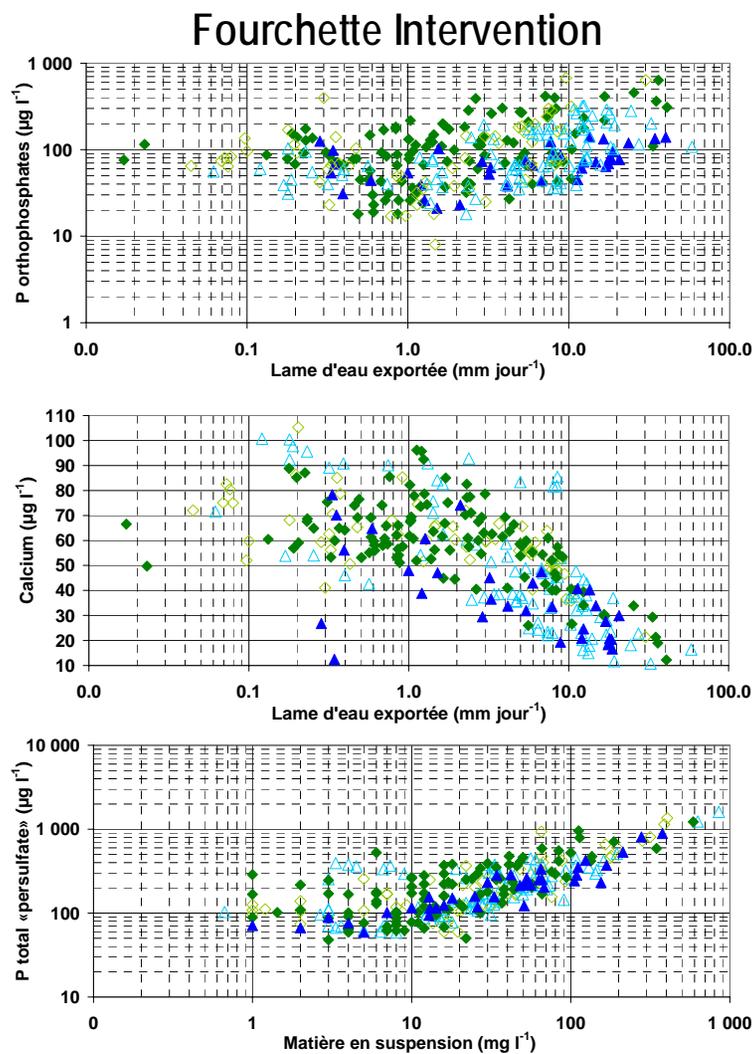
5.1.3 Variabilité des paramètres de qualité de l'eau en fonction du débit à l'exutoire pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) et la période d'évaluation (octobre 2004 à décembre 2006) des bassins du réseau Fourchette.



◇ Production - Période de référence △ Recharge - Période de référence ◆ Production - Période d'évaluation ▲ Recharge - Période d'évaluation

ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

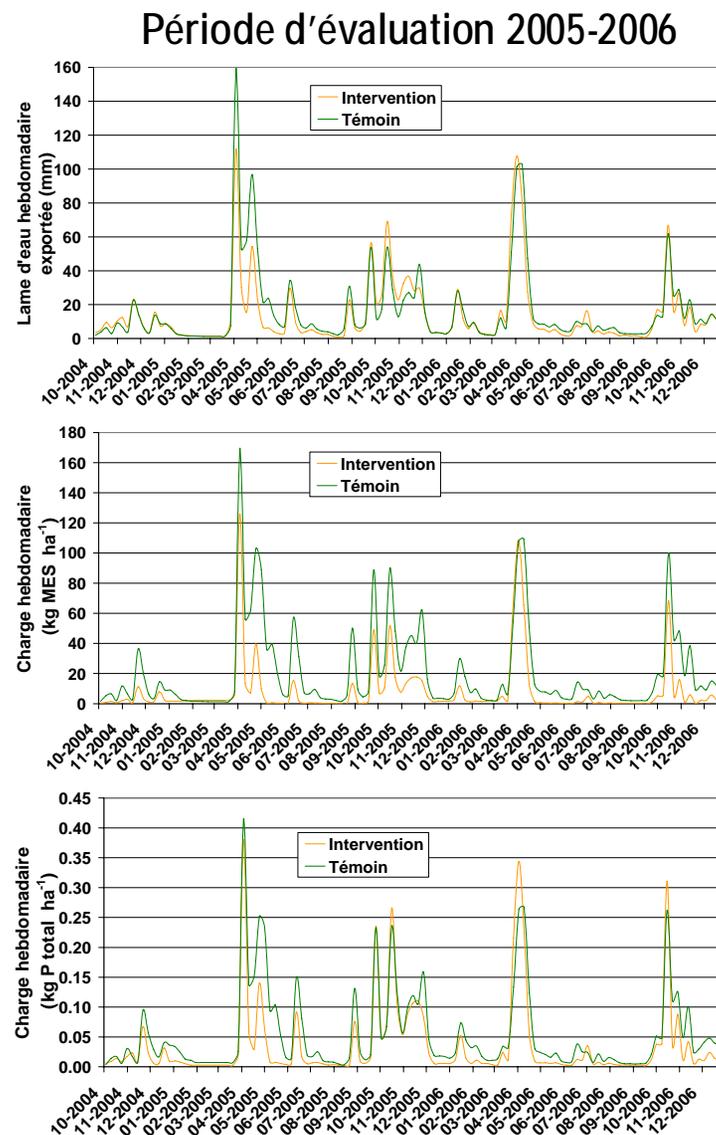
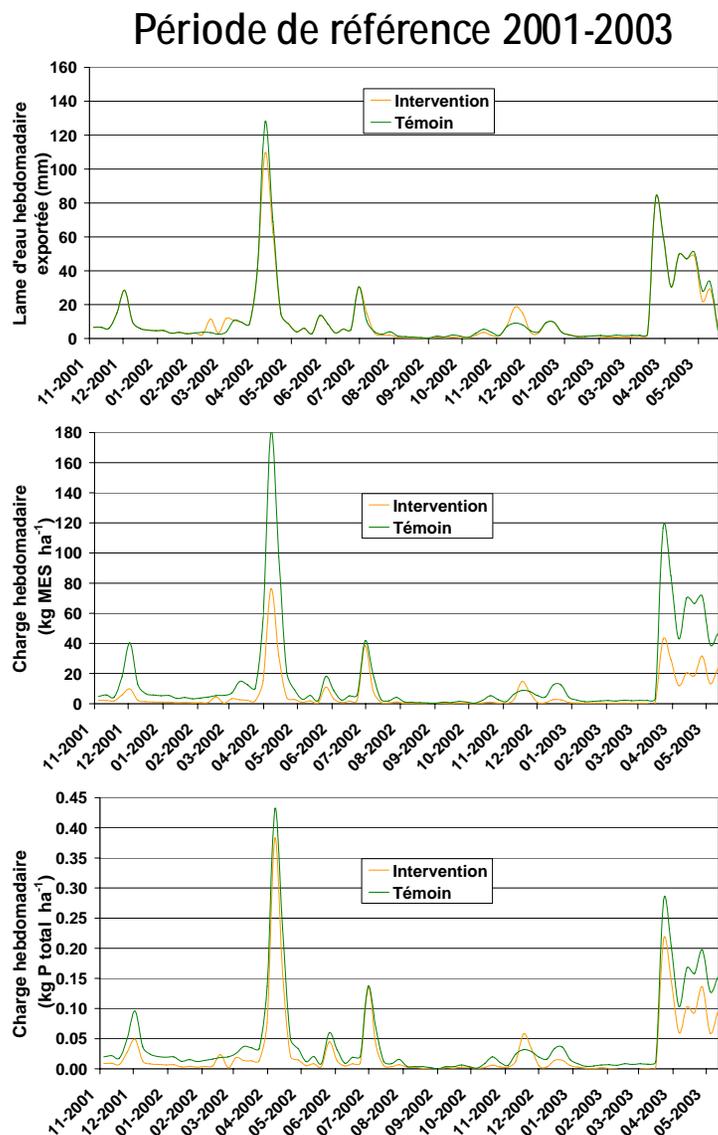
5.1.3 Variabilité des paramètres de qualité de l'eau en fonction du débit à l'exutoire pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) et la période d'évaluation (octobre 2004 à décembre 2006) des bassins du réseau Fourchette (suite).



◇ Production - Période de référence △ Recharge - Période de référence ◆ Production - Période d'évaluation ▲ Recharge - Période d'évaluation

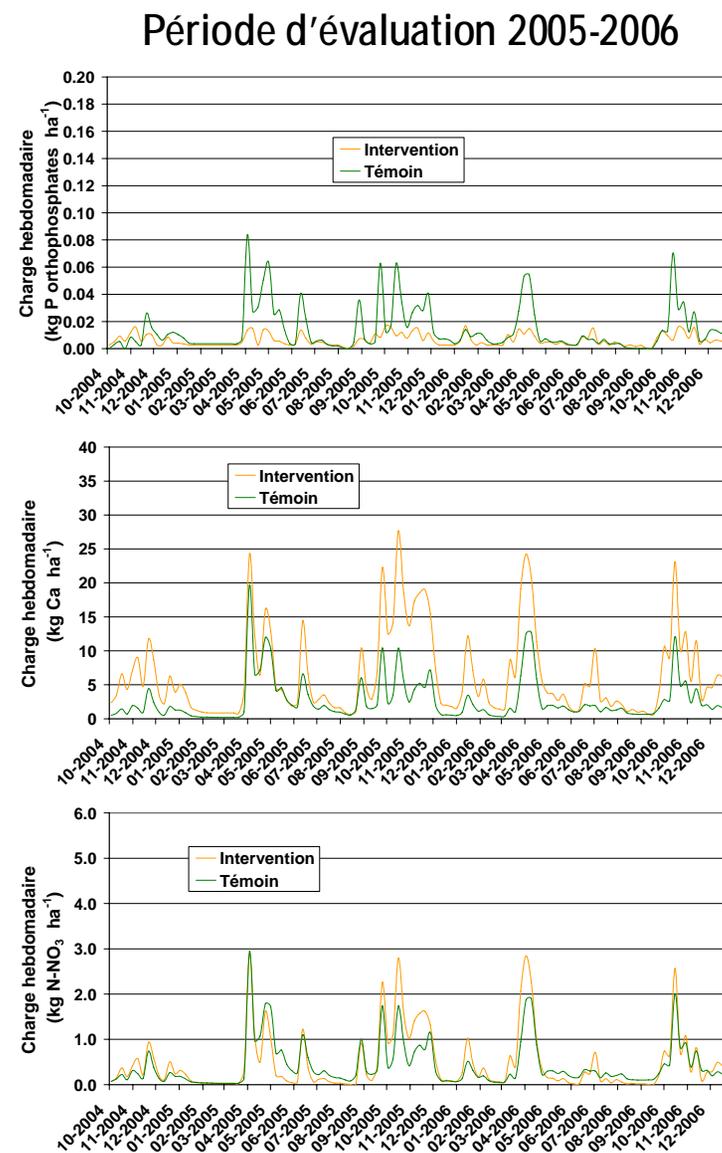
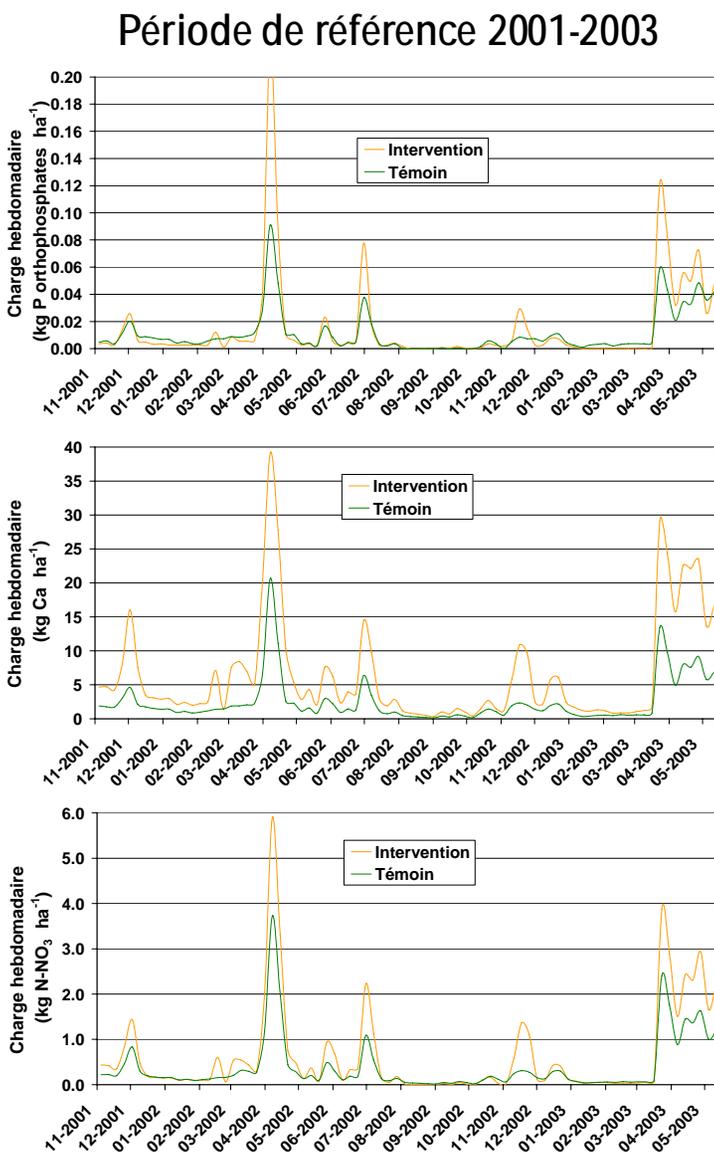
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.1.4 Séries chronologiques des charges hebdomadaires en fonction du temps des bassins jumeaux du réseau Fourchette.



ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

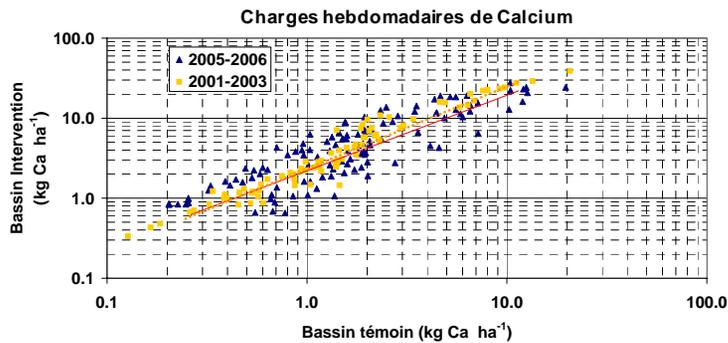
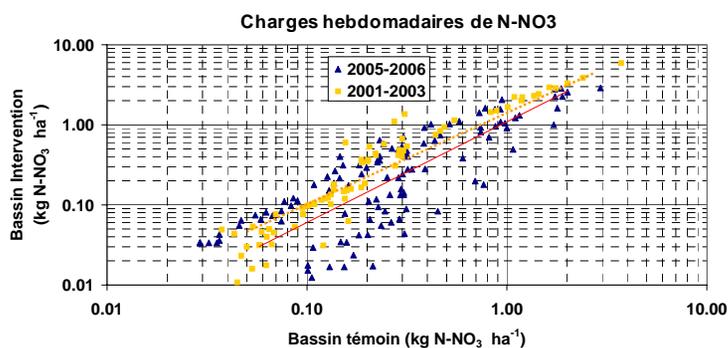
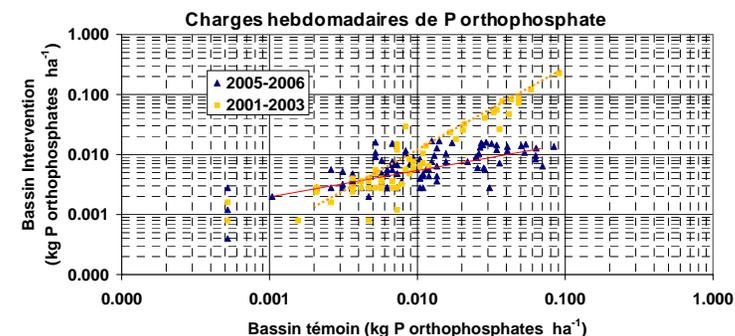
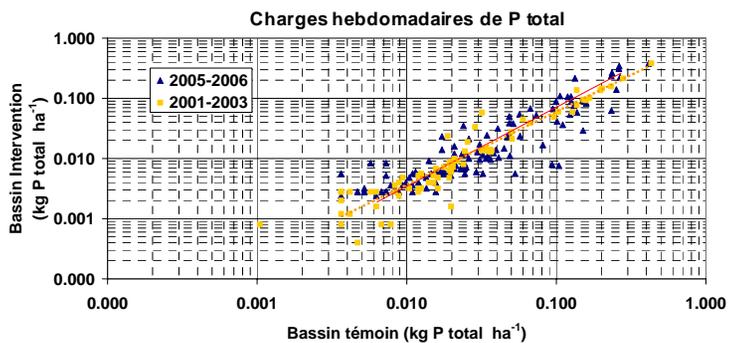
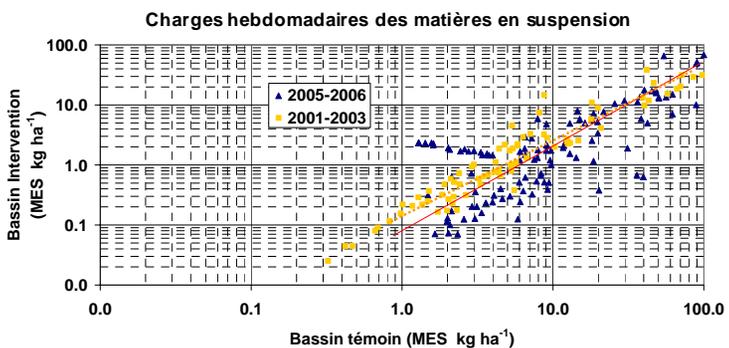
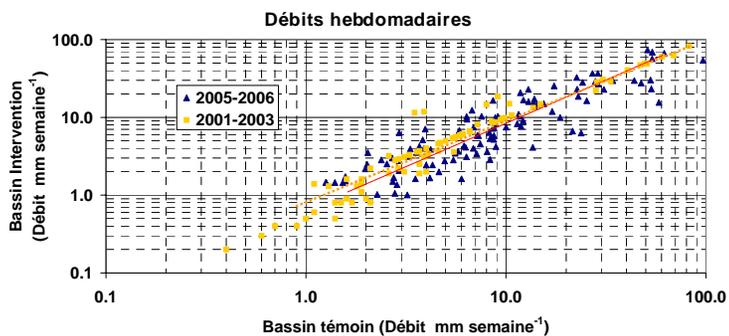
5.1.4 Séries chronologiques des charges hebdomadaires en fonction du temps des bassins jumeaux du réseau Fourchette (suite).



ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.1.5 Comparaisons des charges hebdomadaires des bassins jumeaux du réseau Fourchette.

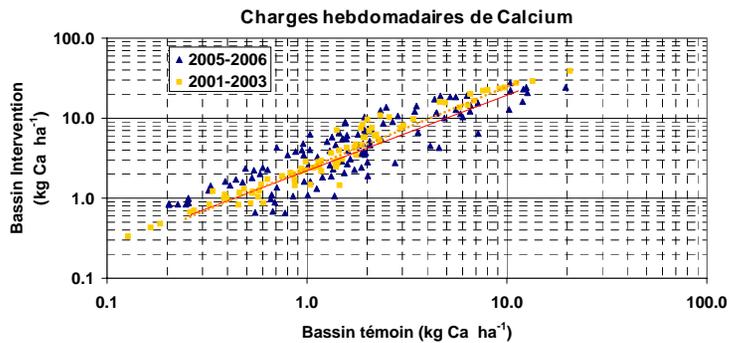
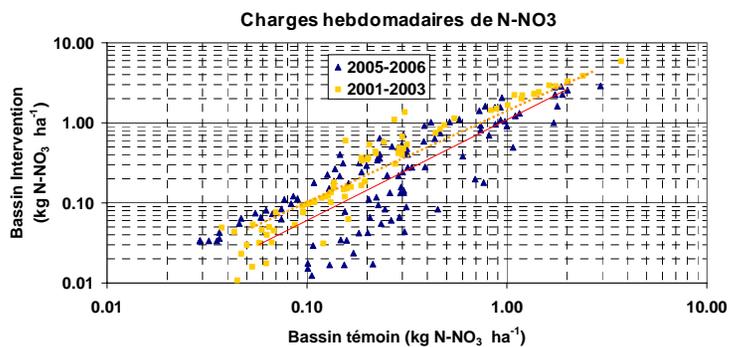
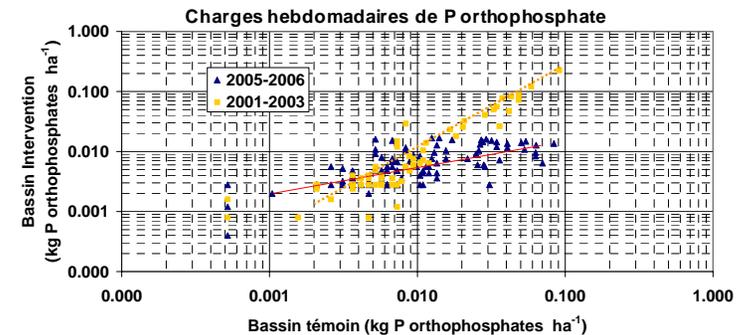
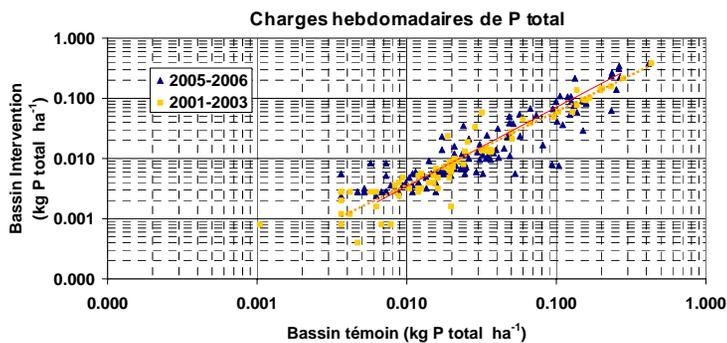
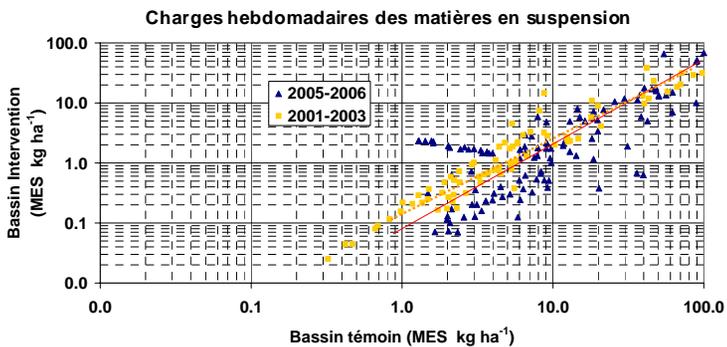
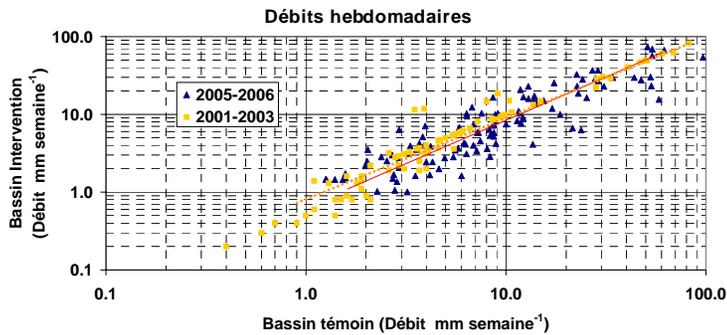
Charge hebdomadaire Témoin versus Intervention



ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

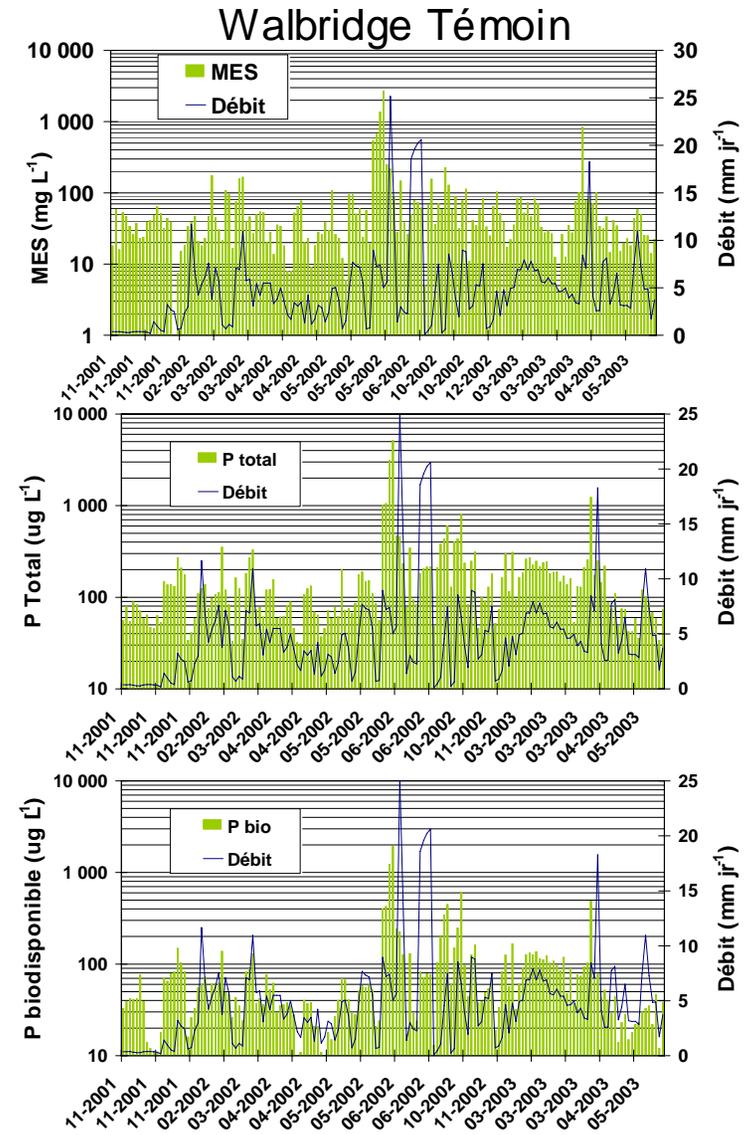
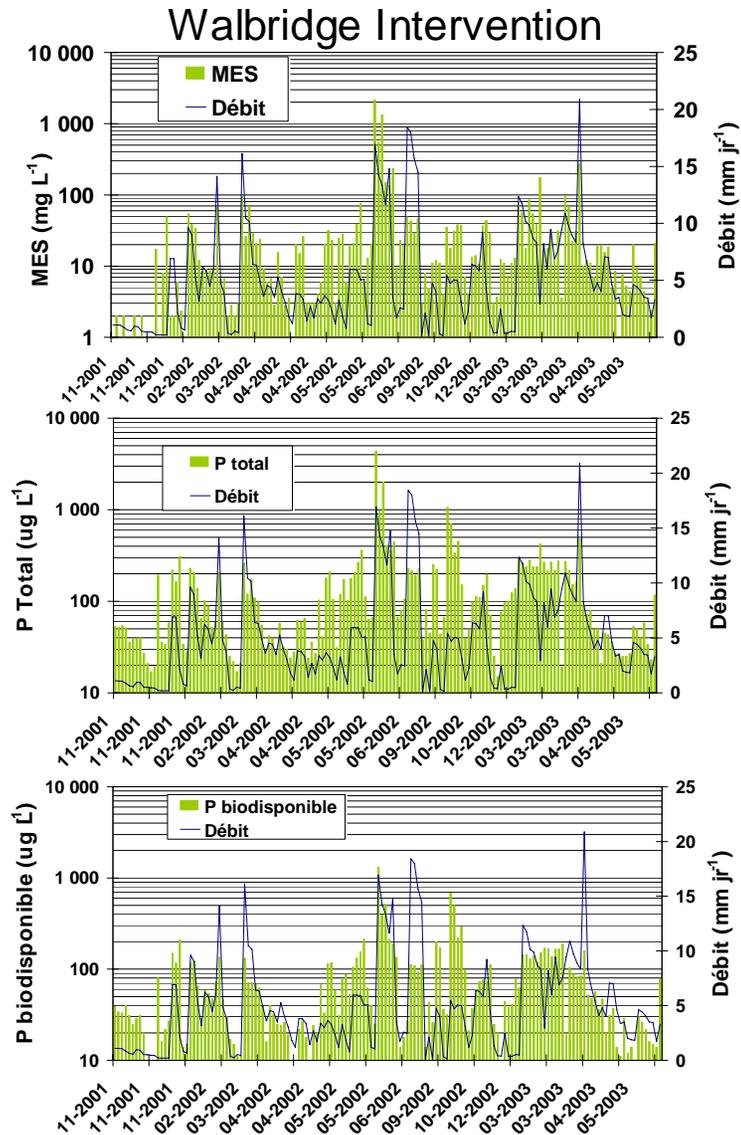
5.1.5 Comparaisons des charges hebdomadaires des bassins jumeaux du réseau Fourchette (suite).

Charge hebdomadaire Témoin versus Intervention



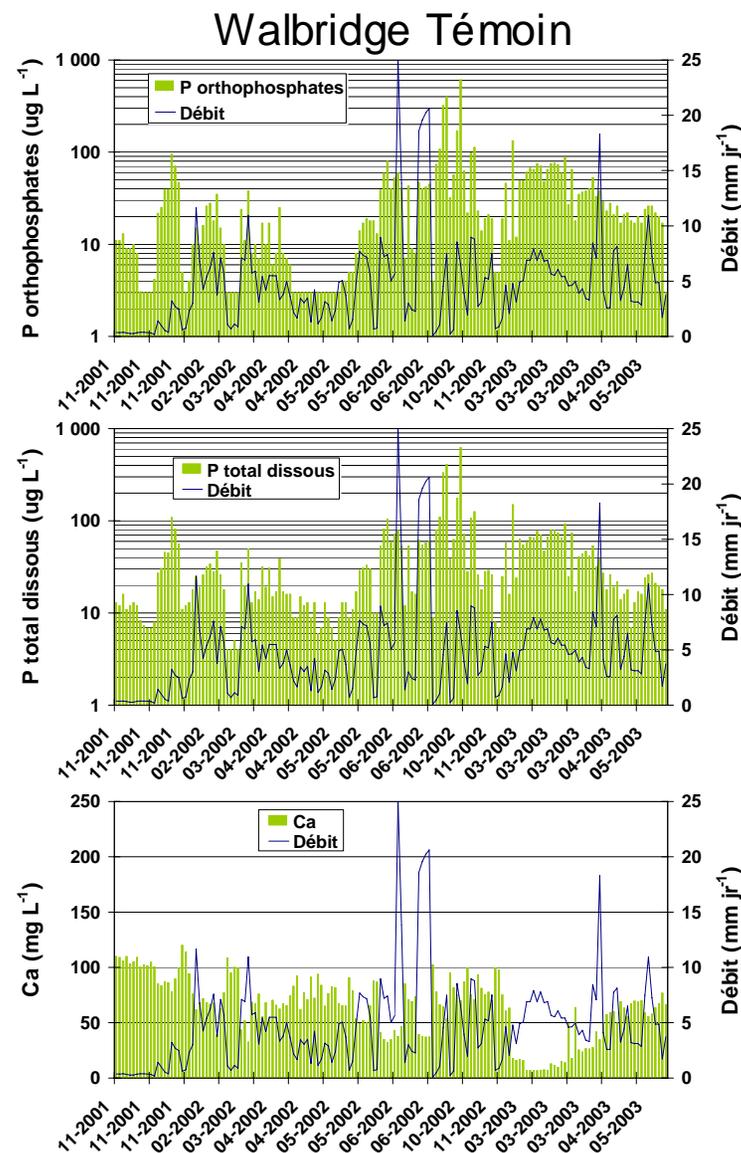
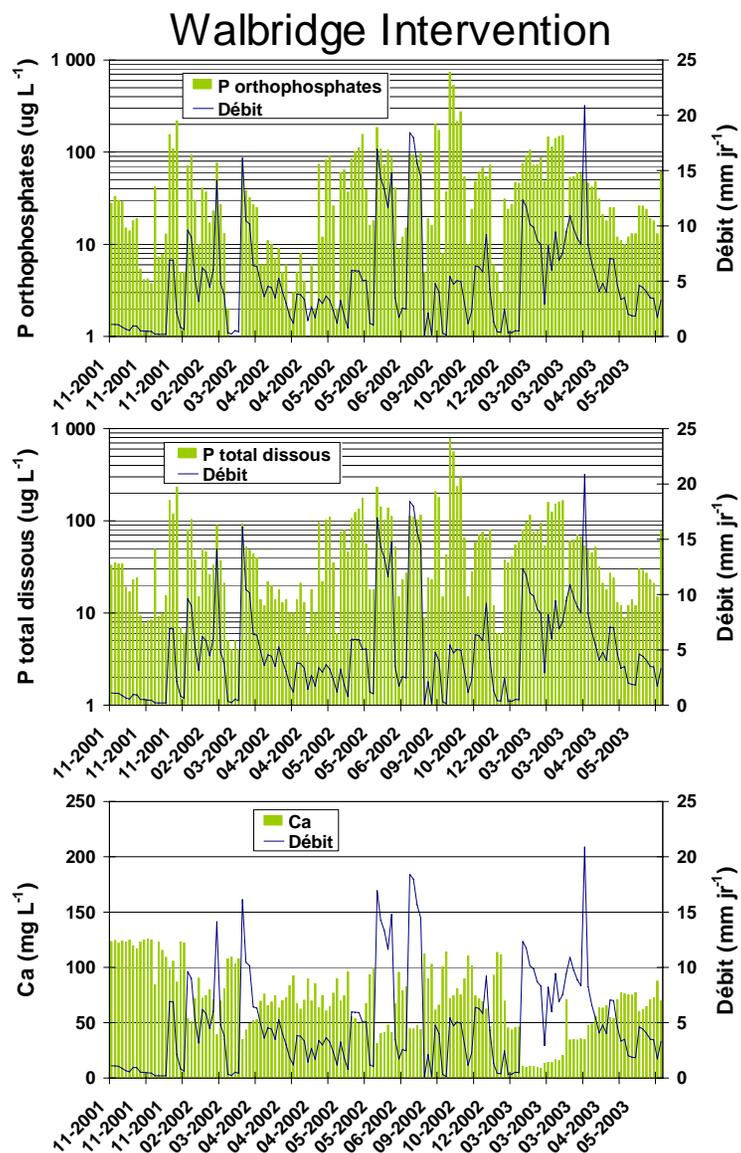
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.2.1 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) des bassins du réseau Walbridge.



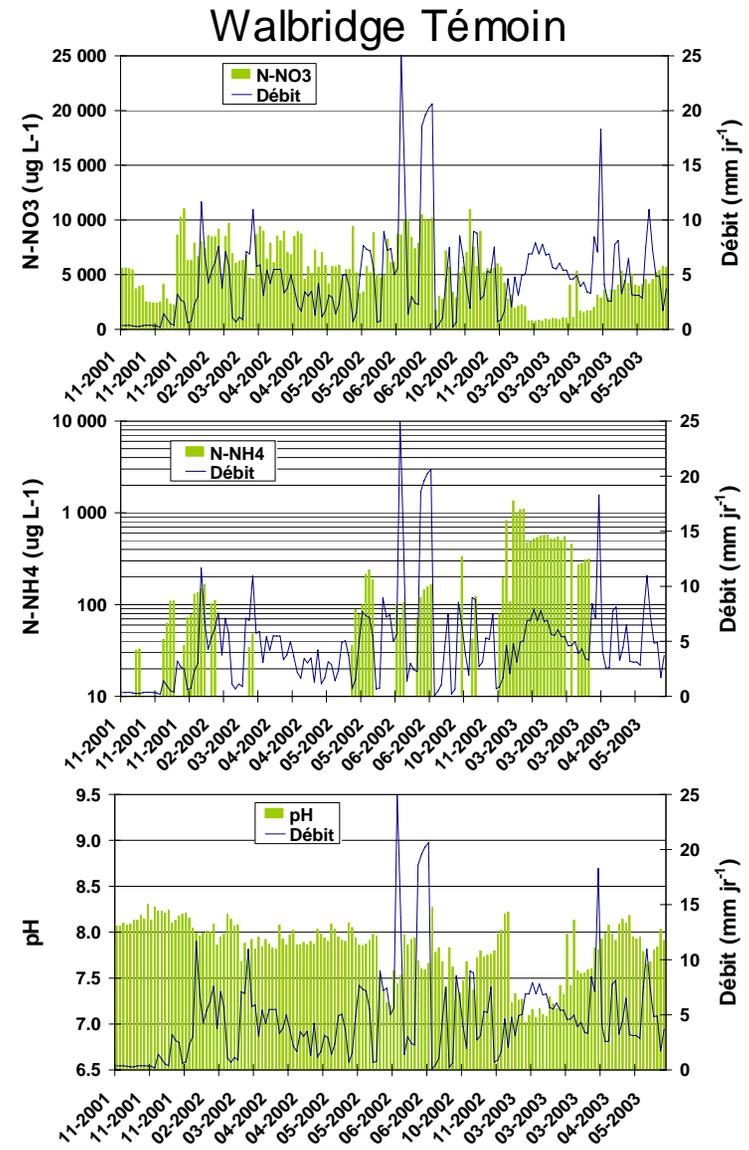
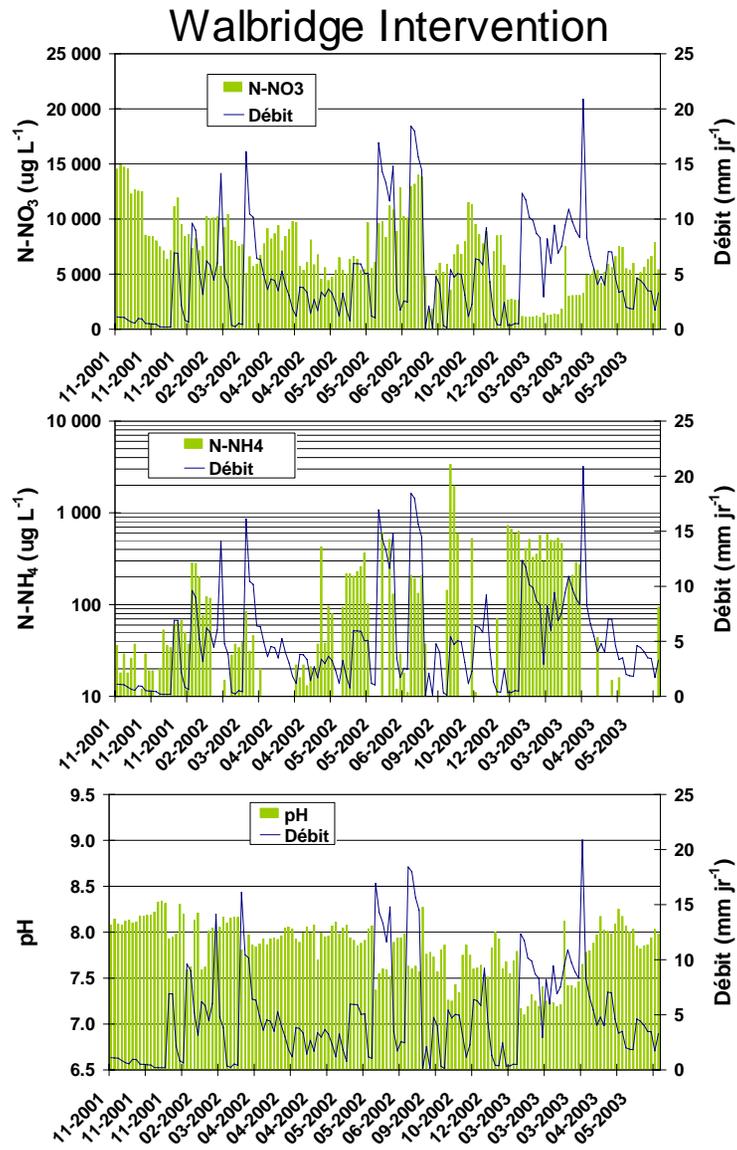
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.2.1 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) des bassins du réseau Walbridge (suite).



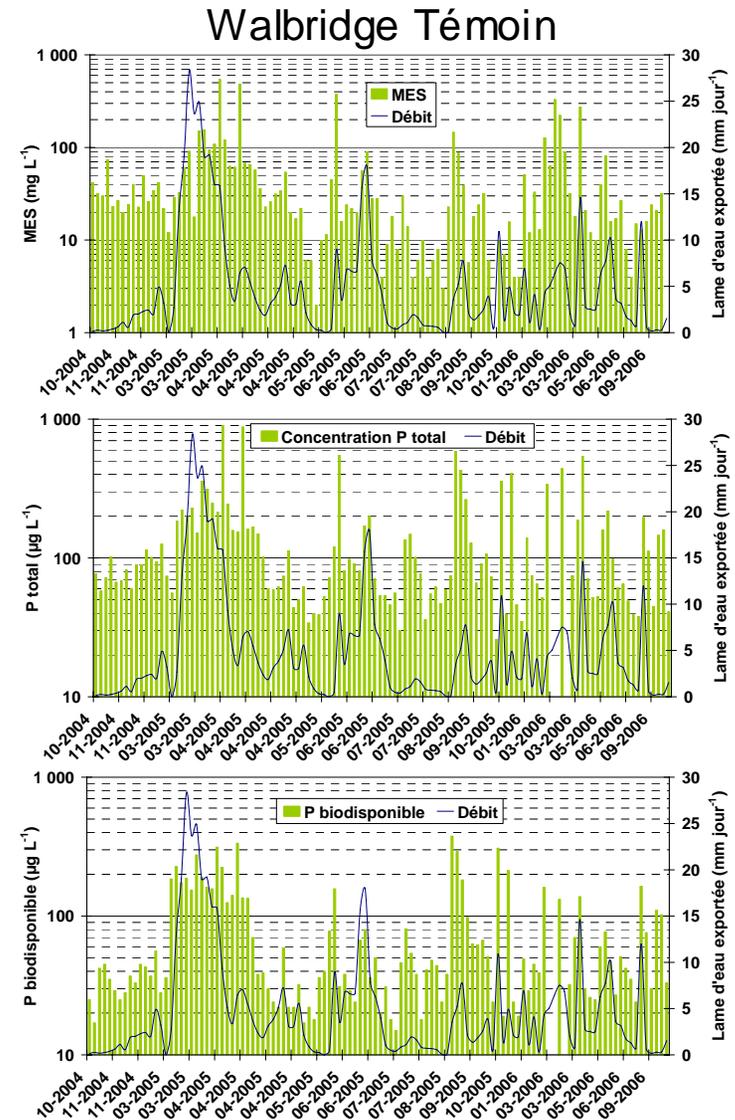
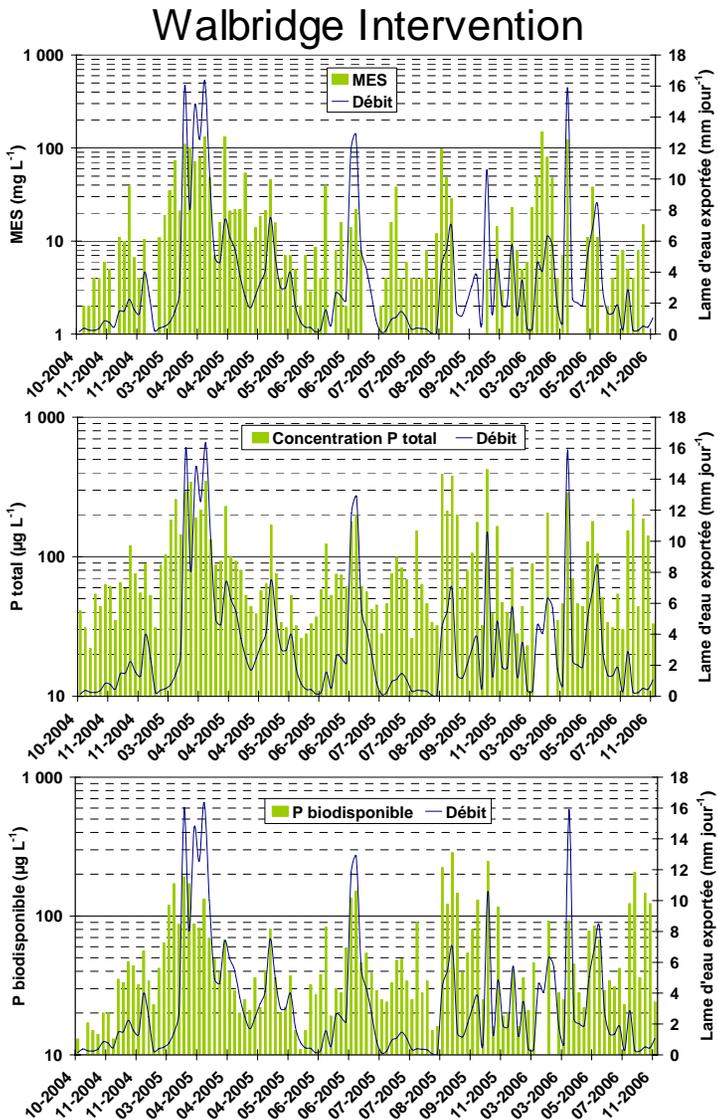
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.2.1 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) des bassins du réseau Walbridge (suite).



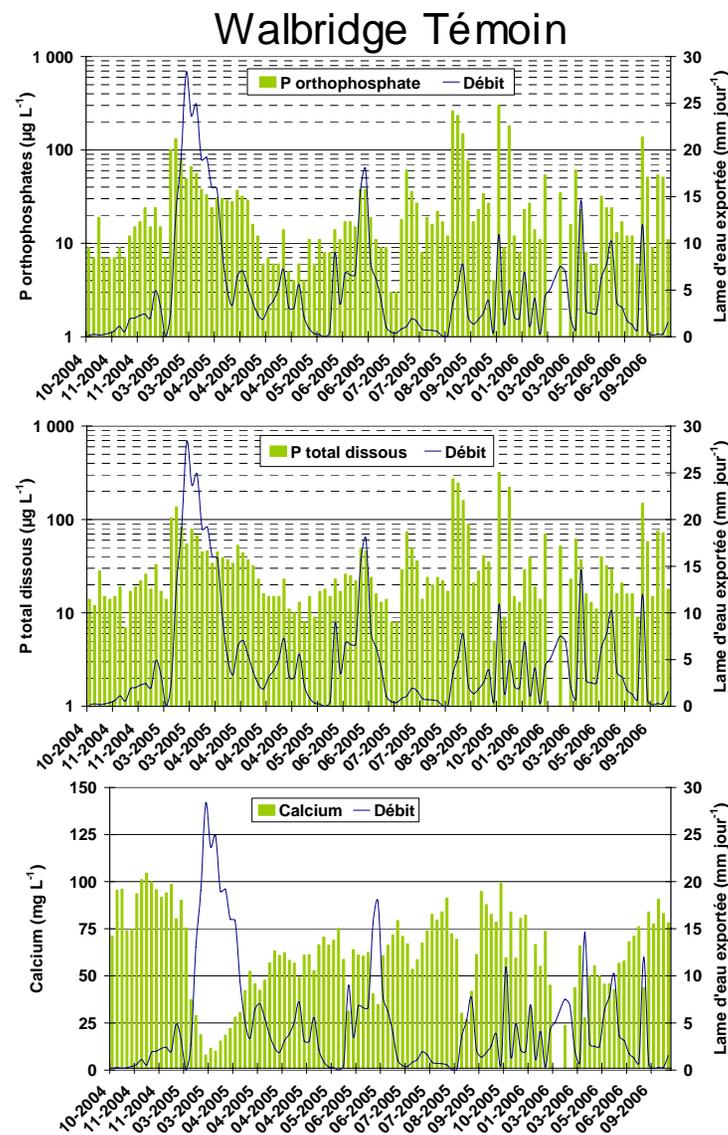
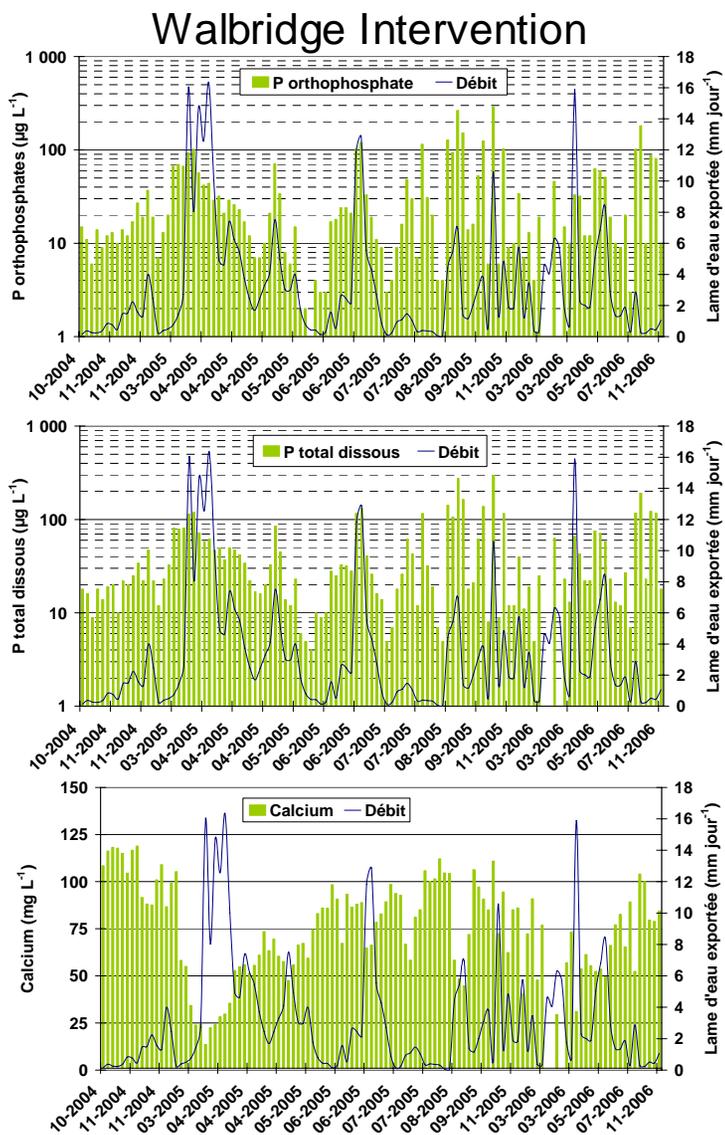
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.2.2 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période d'évaluation (octobre 2004 à novembre 2006) des bassins du réseau Walbridge.



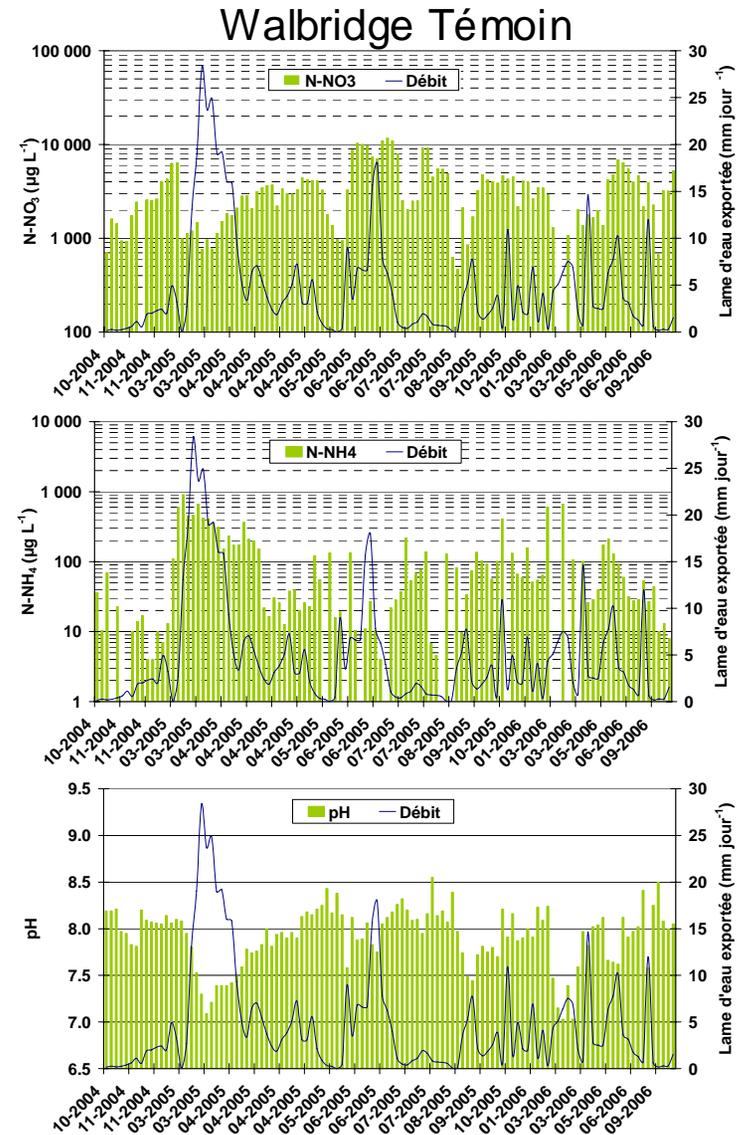
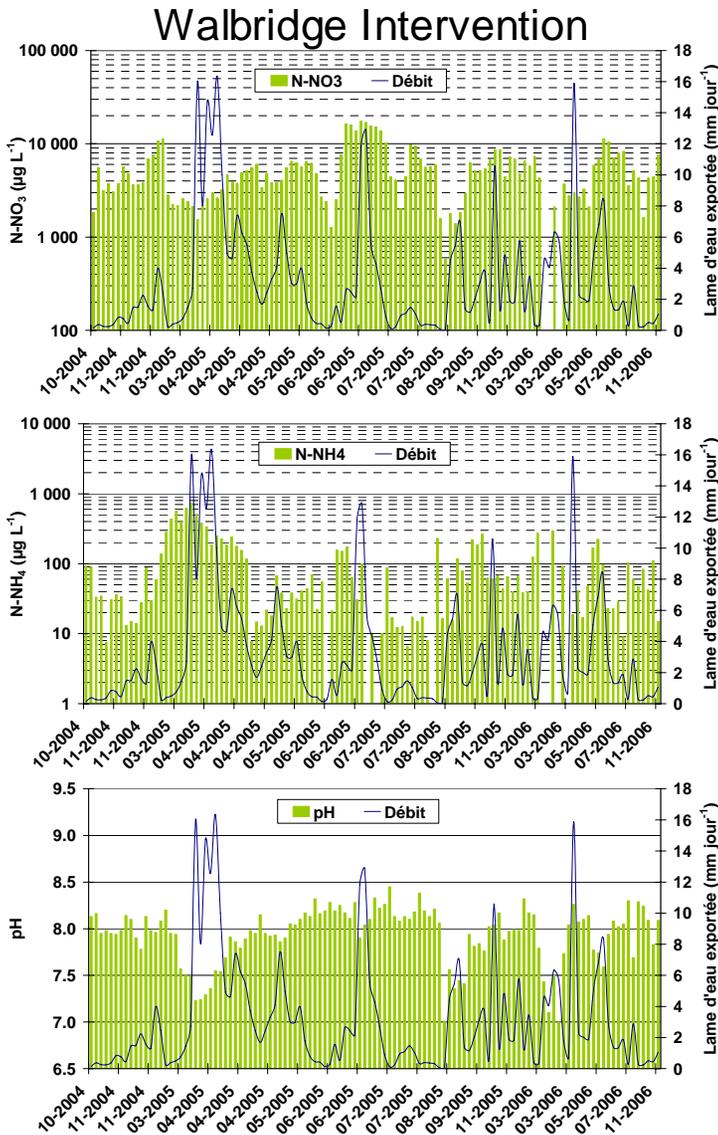
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.2.2 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période d'évaluation (octobre 2004 à novembre 2006) des bassins du réseau Walbridge (suite).



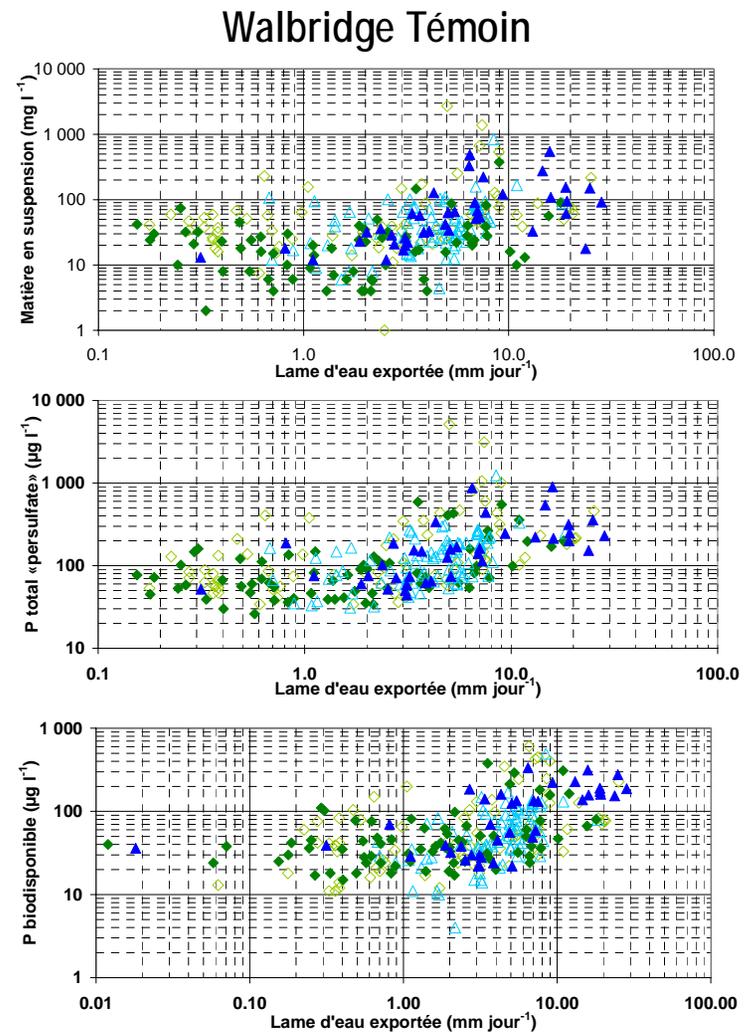
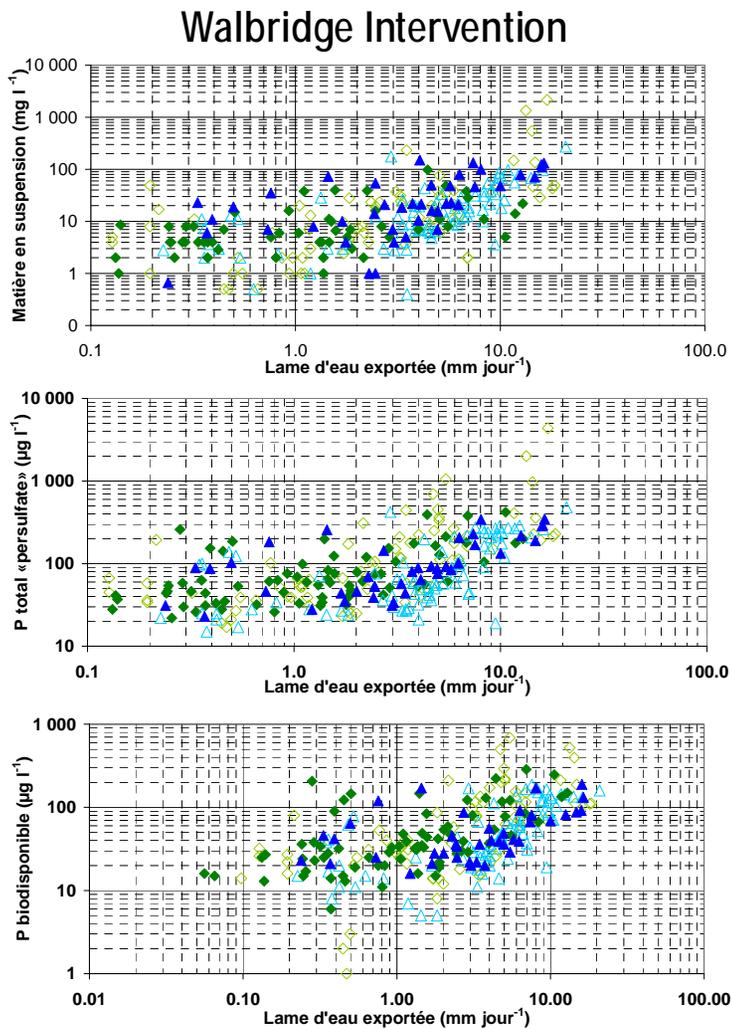
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.2.2 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période d'évaluation (octobre 2004 à novembre 2006) des bassins du réseau Walbridge (suite).



ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

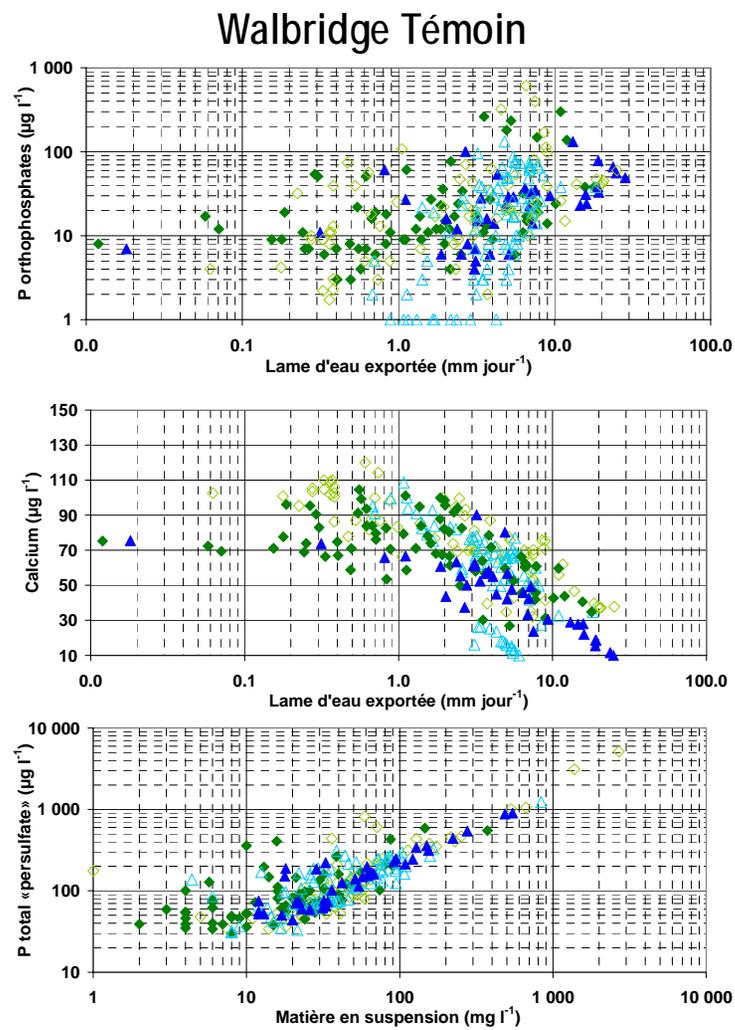
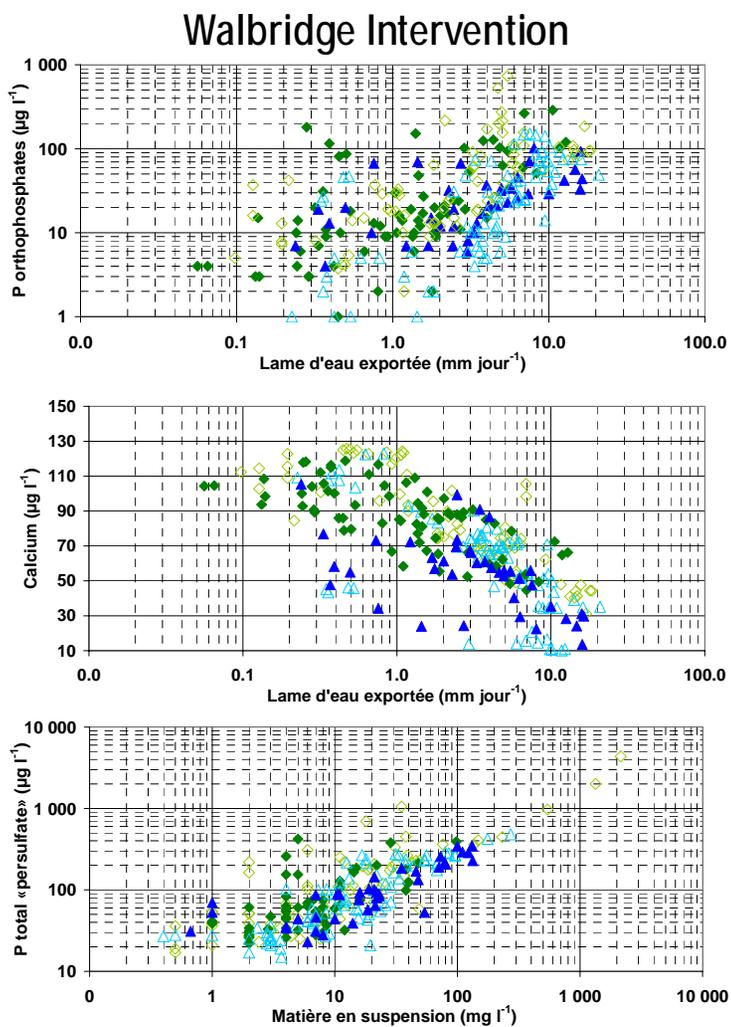
5.2.3 Variabilité des paramètres de qualité de l'eau en fonction du débit à l'exutoire pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) et la période d'évaluation (octobre 2004 à novembre 2006) des bassins du réseau Walbridge.



◇ Production - Période de référence △ Recharge - Période de référence ◆ Production - Période d'évaluation ▲ Recharge - Période d'évaluation

ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

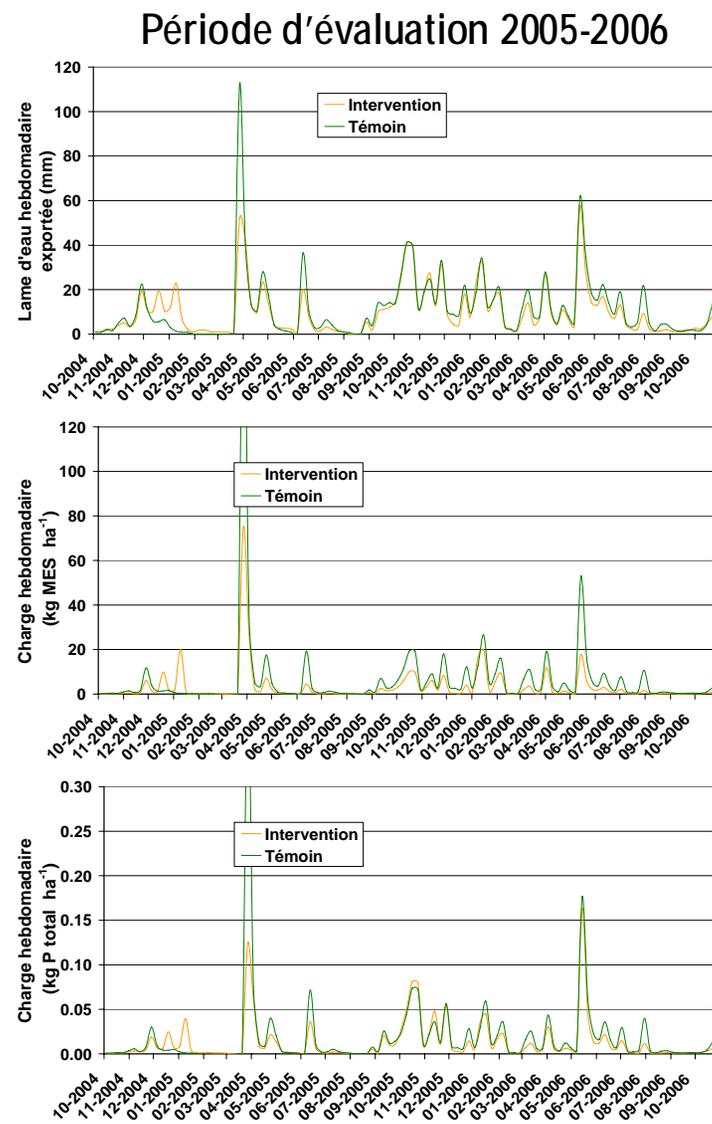
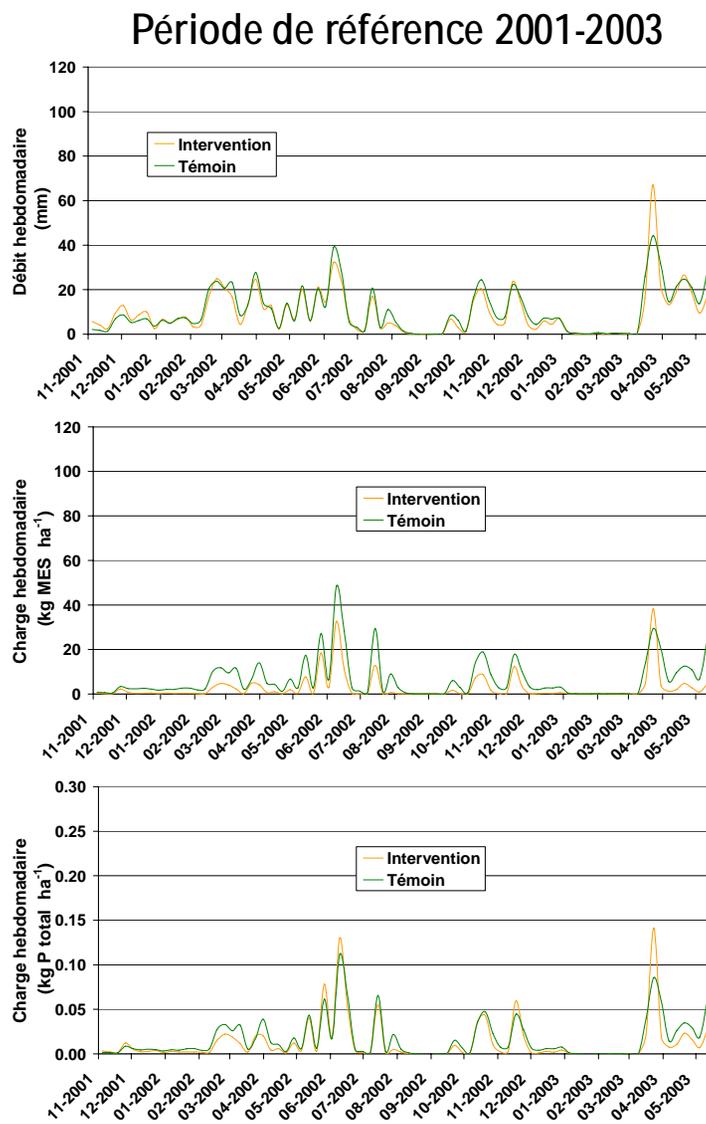
5.2.3 Variabilité des paramètres de qualité de l'eau en fonction du débit à l'exutoire pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) et la période d'évaluation (octobre 2004 à novembre 2006) des bassins du réseau Walbridge (suite).



◇ Production - Période de référence △ Recharge - Période de référence ◆ Production - Période d'évaluation ▲ Recharge - Période d'évaluation

ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

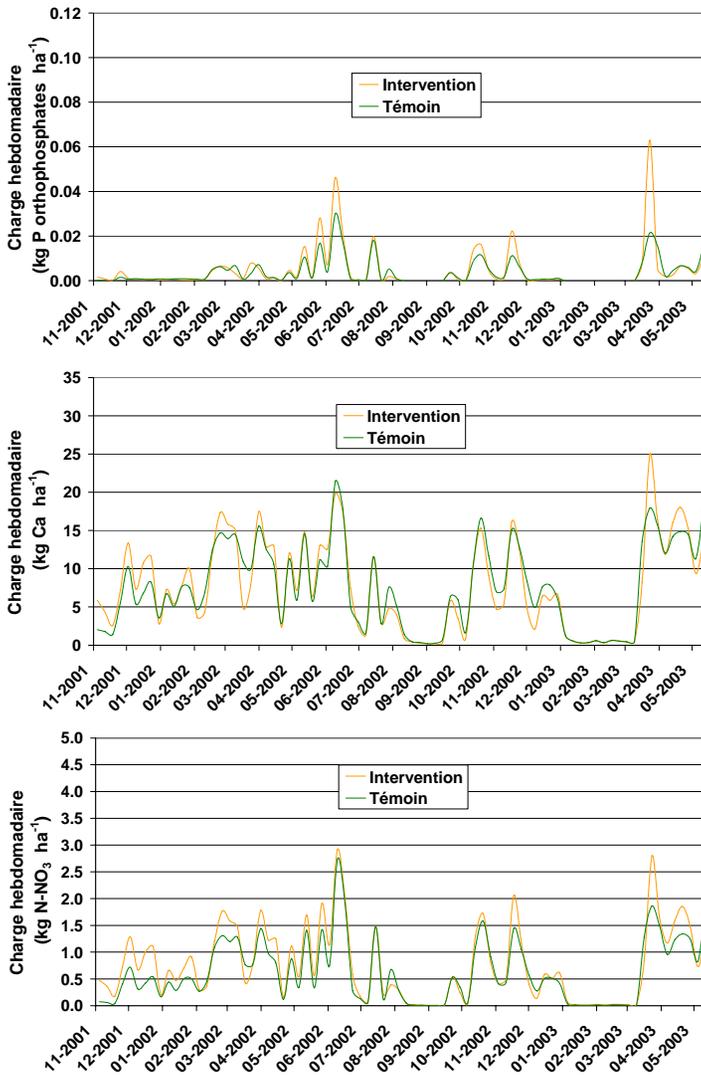
5.2.4 Séries chronologiques des charges hebdomadaires en fonction du temps des bassins jumeaux du réseau Walbridge.



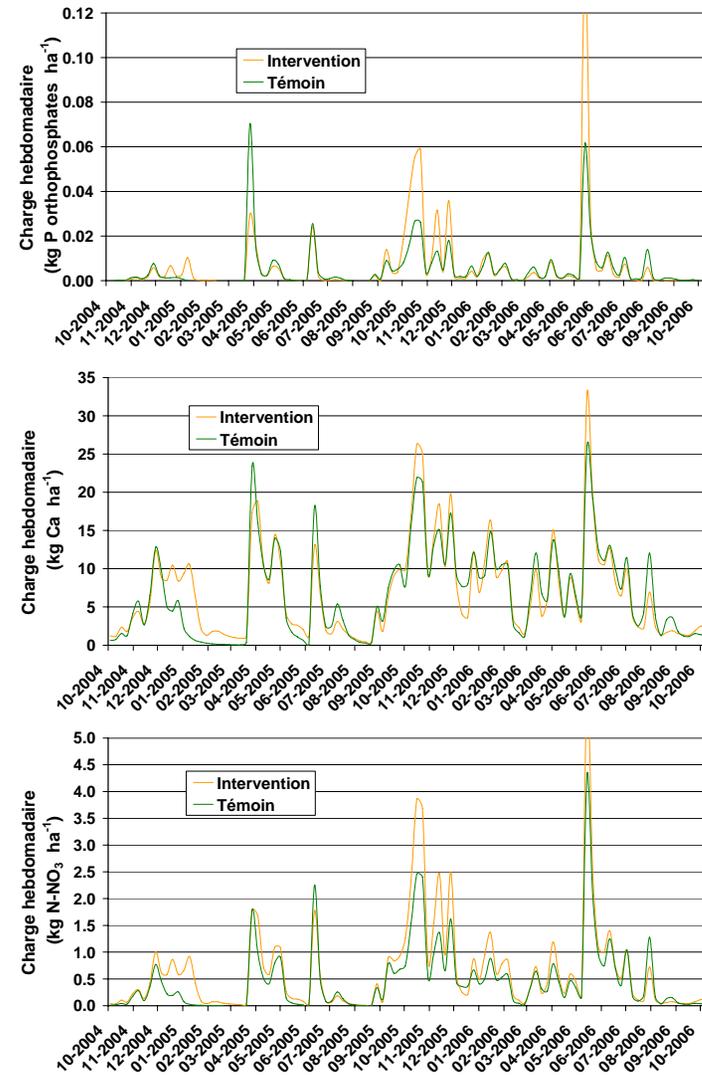
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.2.4 Séries chronologiques des charges hebdomadaires en fonction du temps des bassins jumeaux du réseau Walbridge (suite).

Période de référence 2001-2003



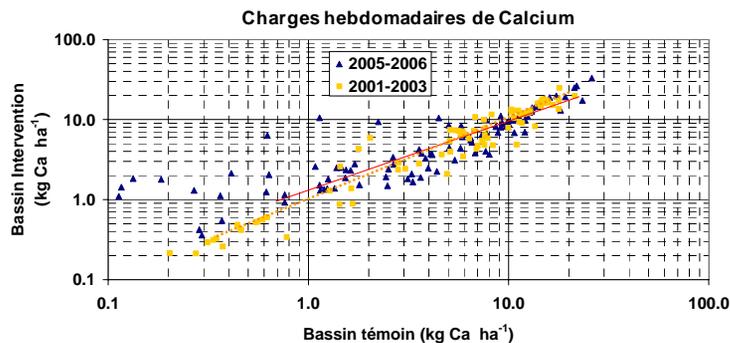
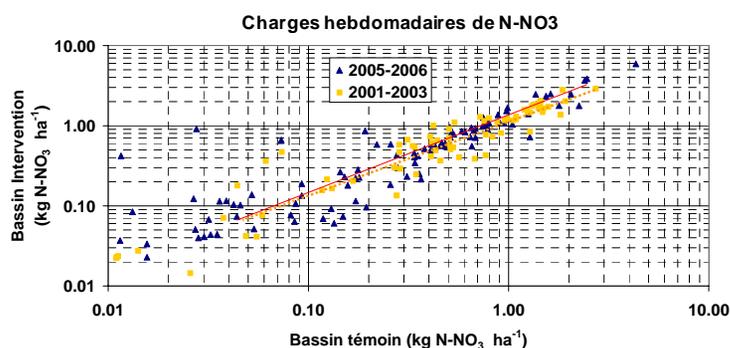
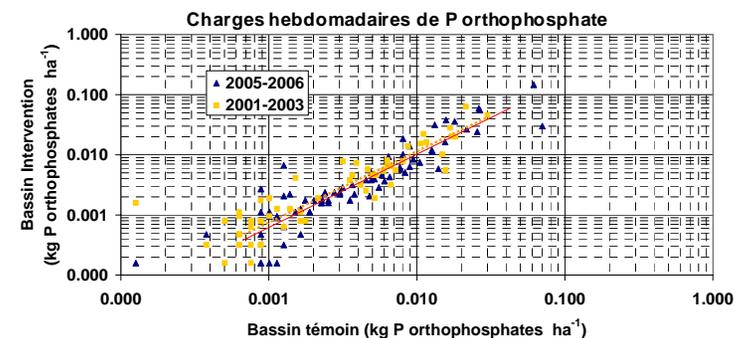
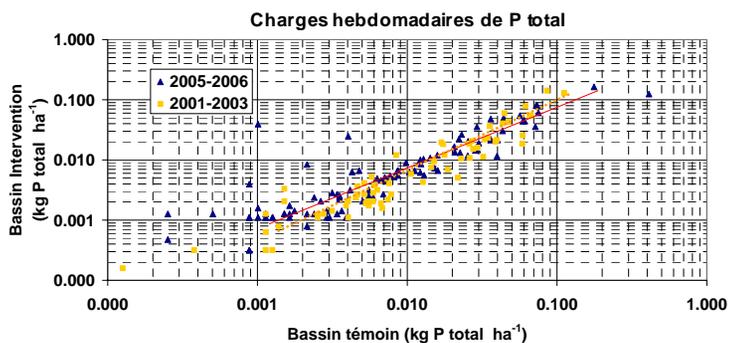
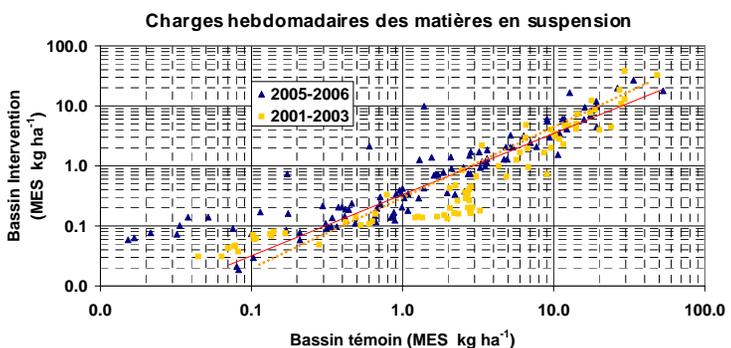
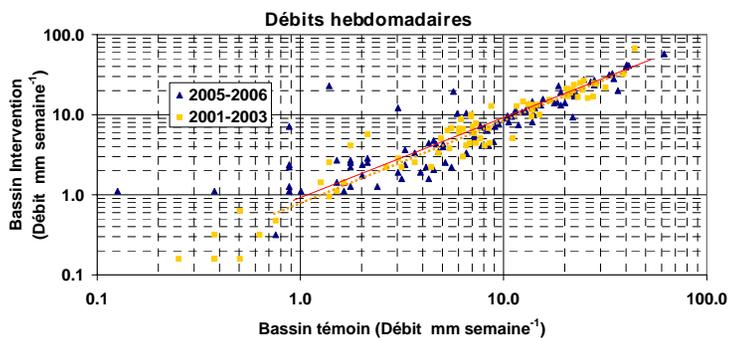
Période d'évaluation 2005-2006



ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

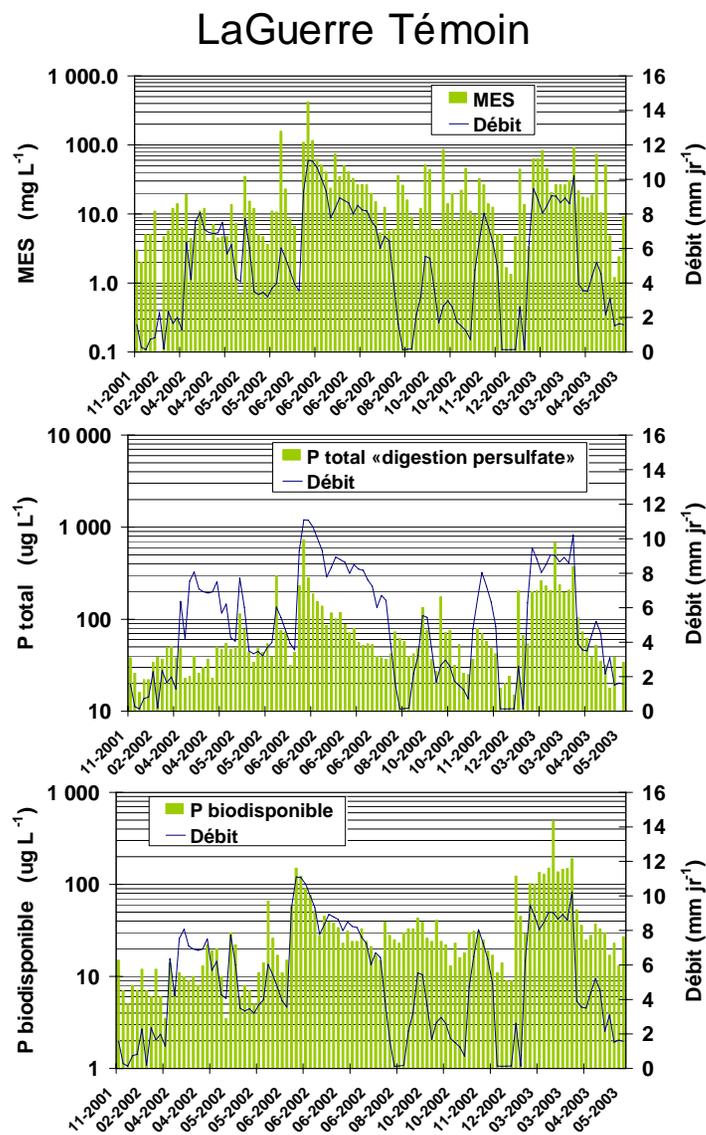
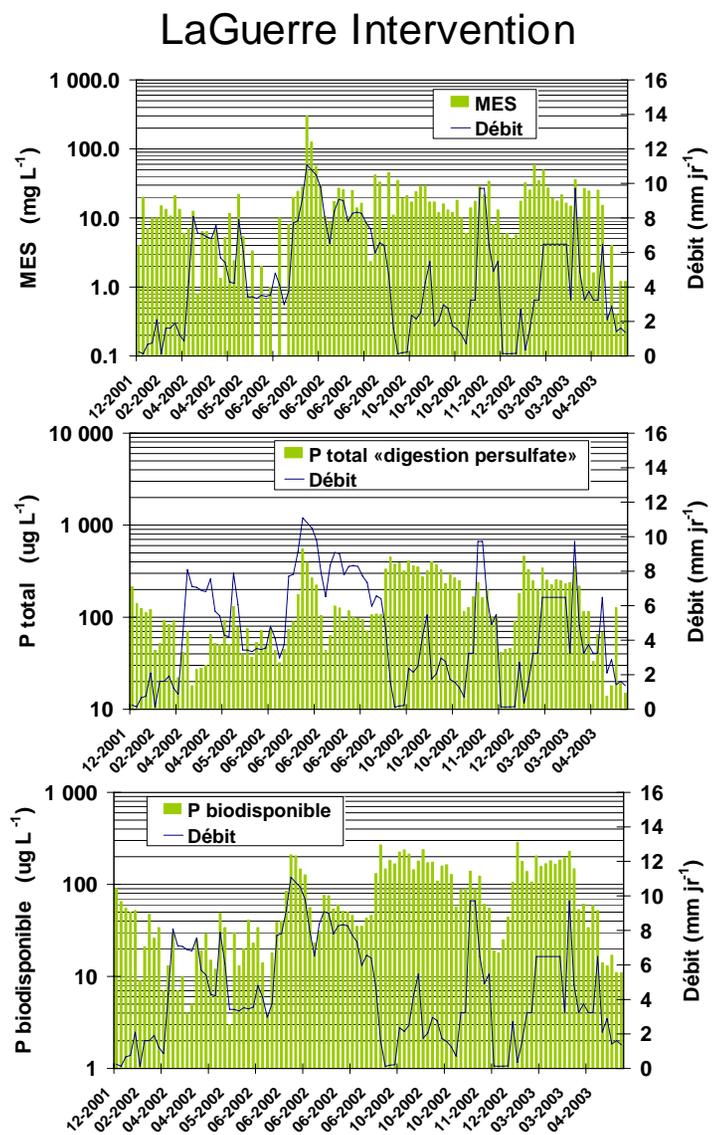
5.2.5 Comparaisons des charges hebdomadaires des bassins jumeaux du réseau Walbridge.

Charge hebdomadaire Témoin versus Intervention



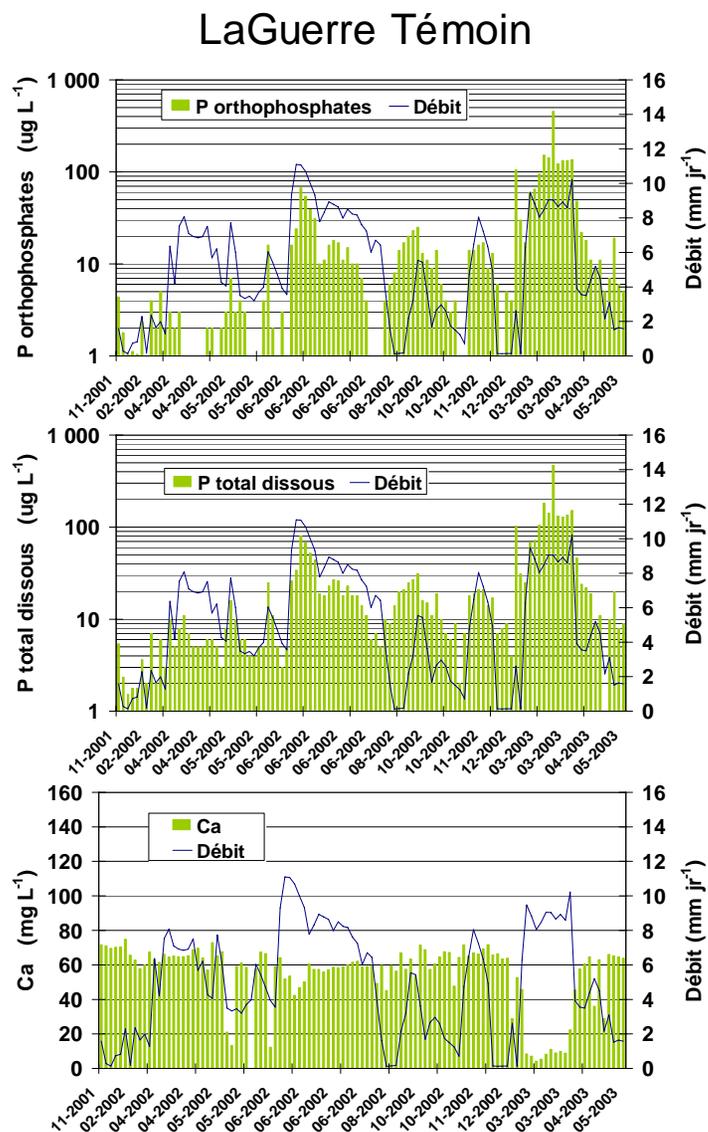
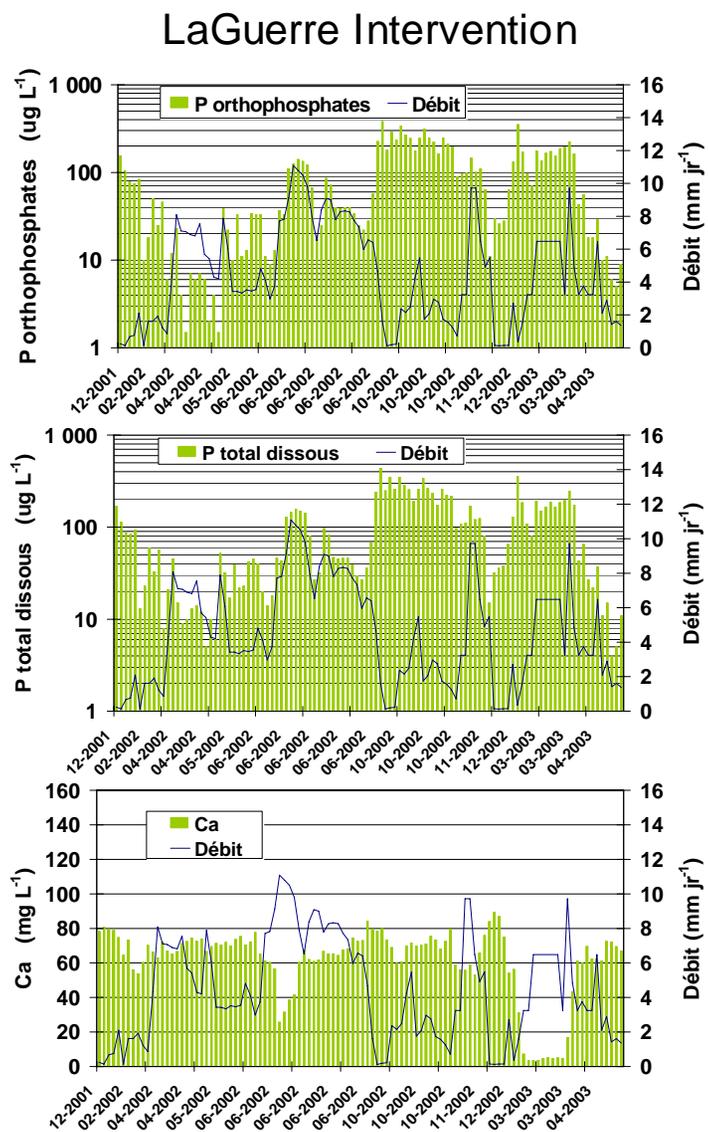
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.3.1 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) des bassins du réseau La Guerre.



ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

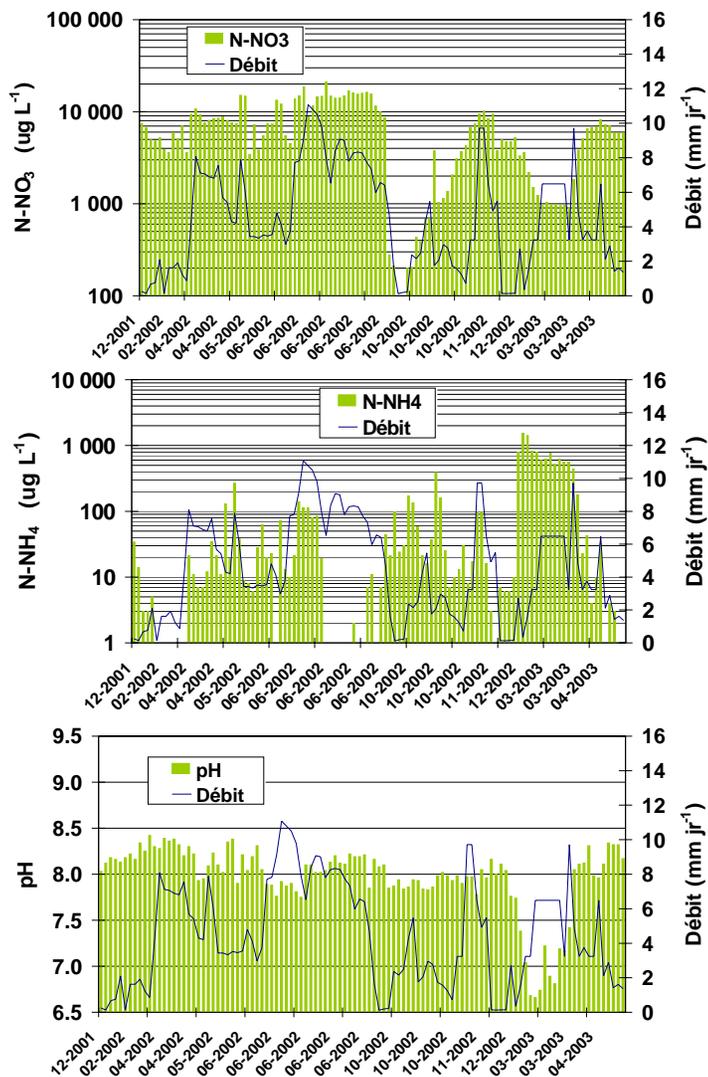
5.3.1 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) des bassins du réseau La Guerre (suite).



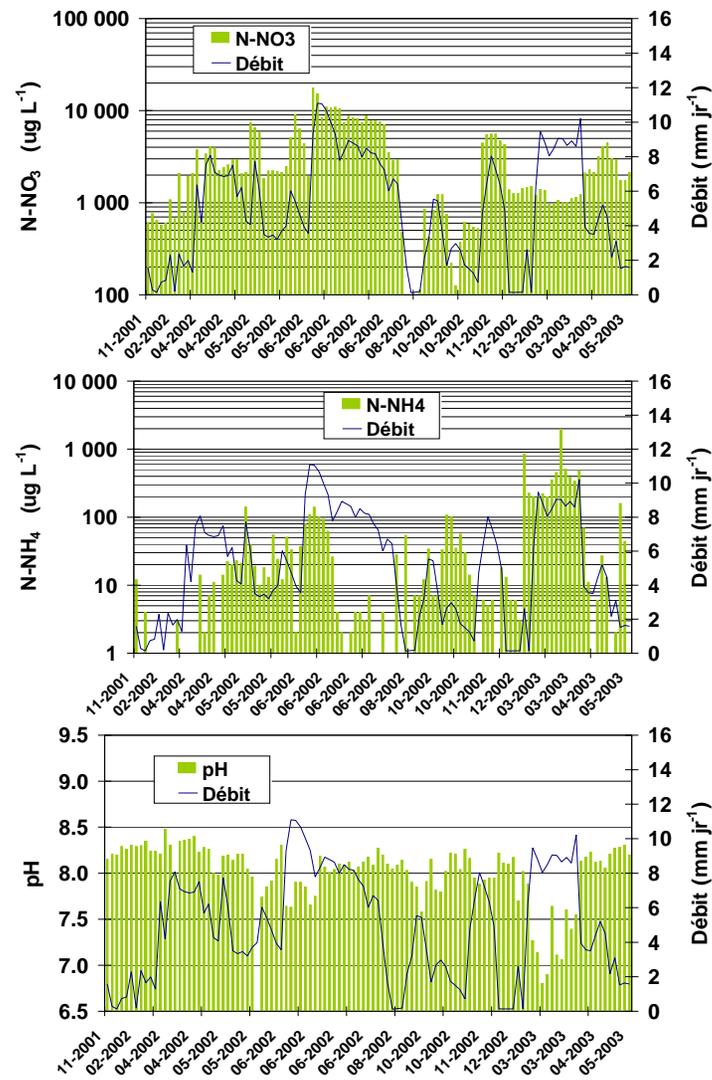
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.3.1 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) des bassins du réseau La Guerre (suite).

LaGuerre Intervention



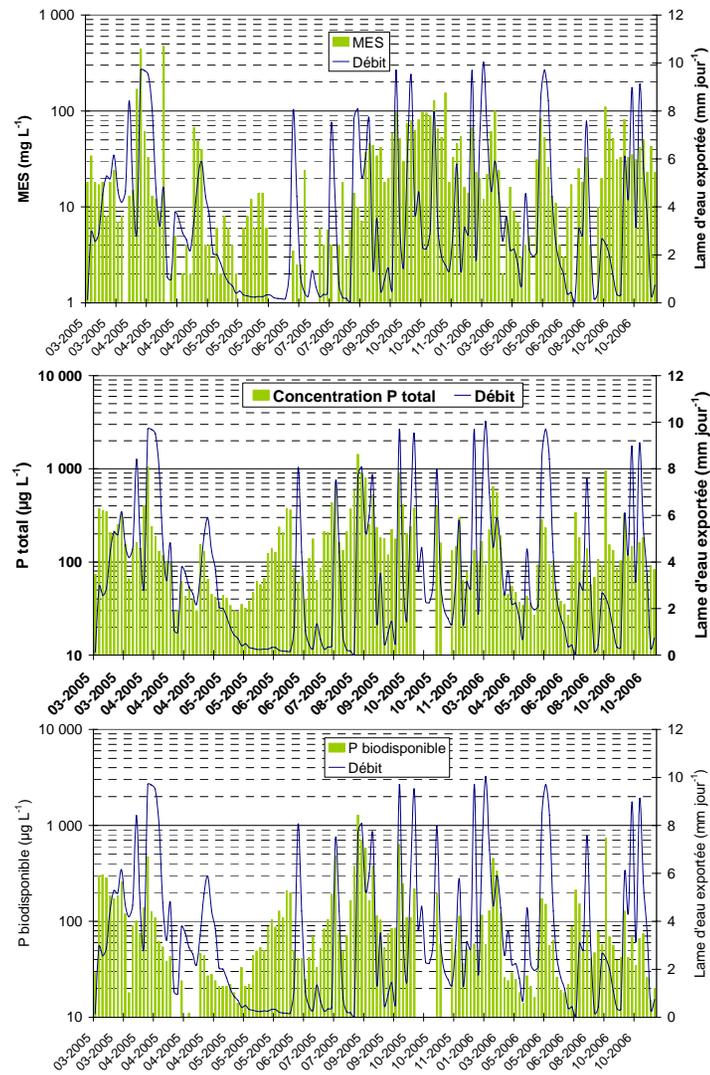
LaGuerre Témoin



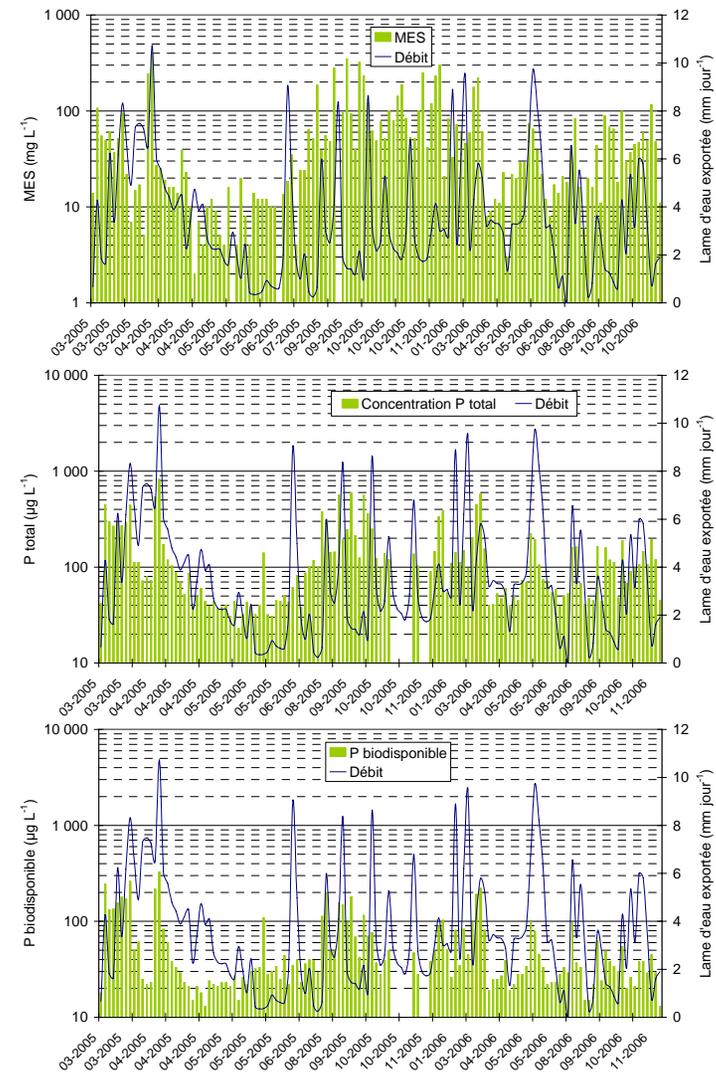
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.3.2 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période d'évaluation (mars 2005 à novembre 2006) des bassins du réseau La Guerre.

LaGuerre Intervention



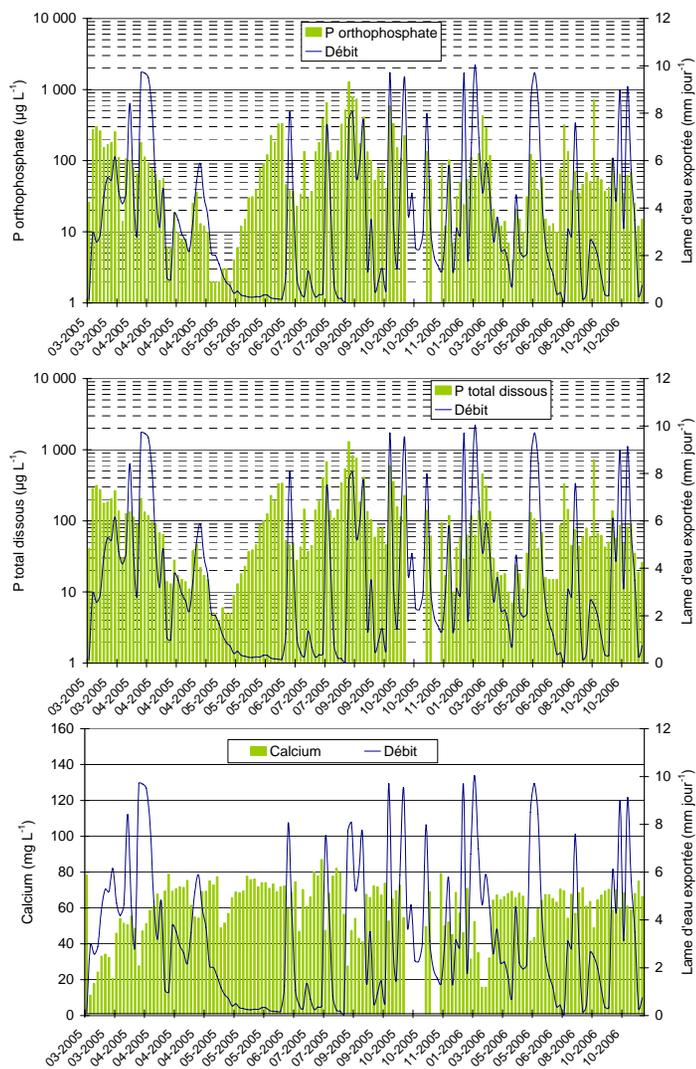
LaGuerre Témoin



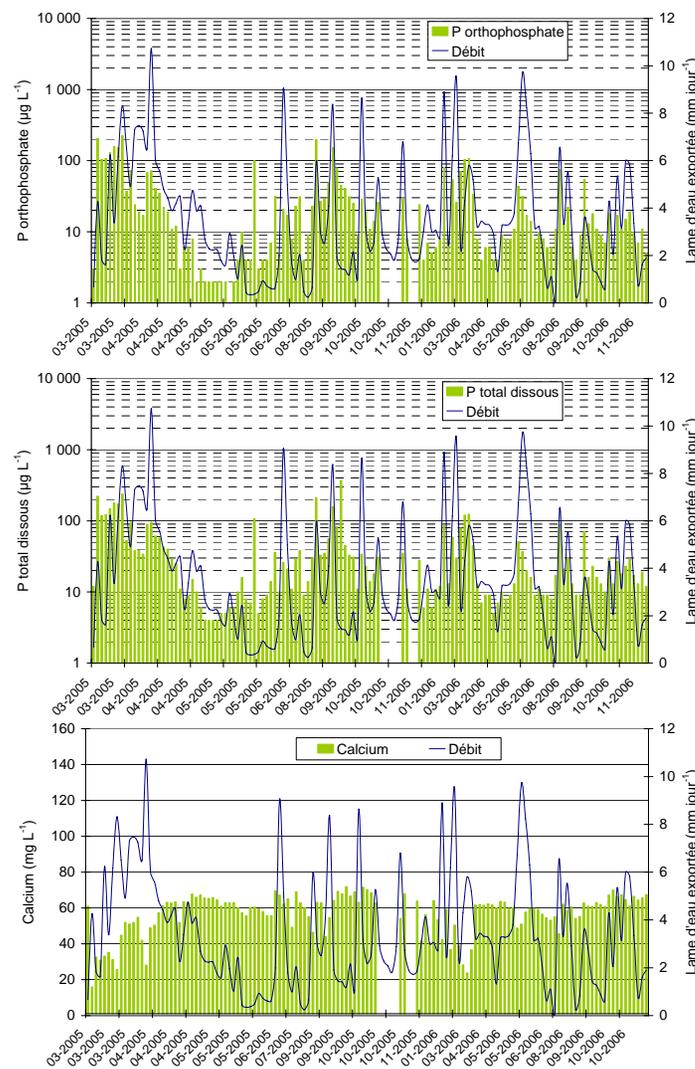
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.3.2 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période d'évaluation (mars 2005 à novembre 2006) des bassins du réseau La Guerre (suite).

LaGuerre Intervention



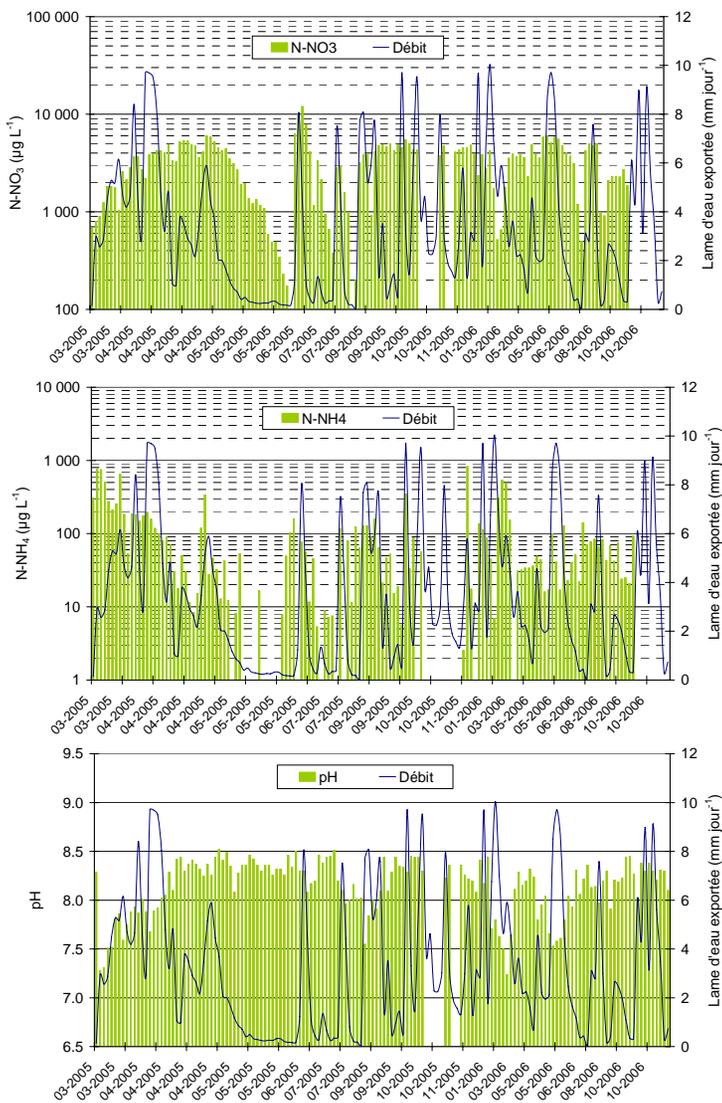
LaGuerre Témoin



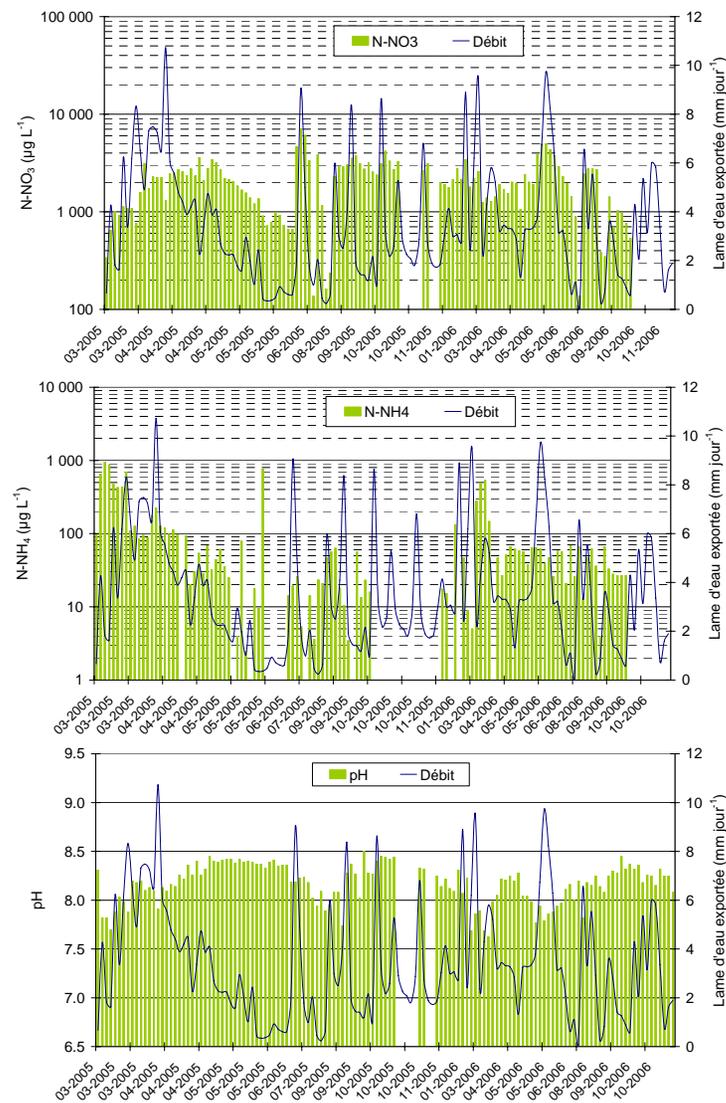
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.3.2 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période d'évaluation (mars 2005 à novembre 2006) des bassins du réseau La Guerre (suite).

LaGuerre Intervention

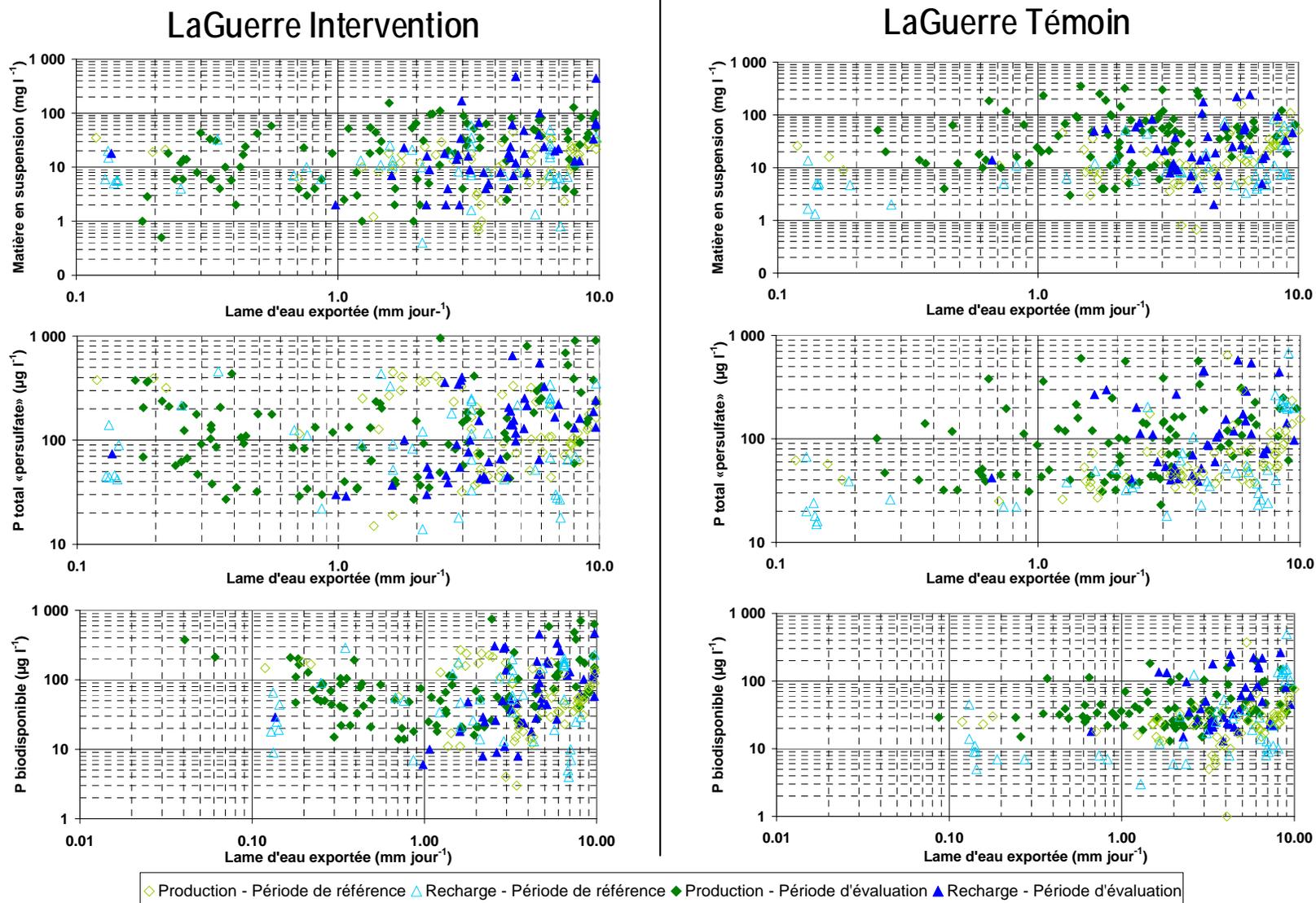


LaGuerre Témoin



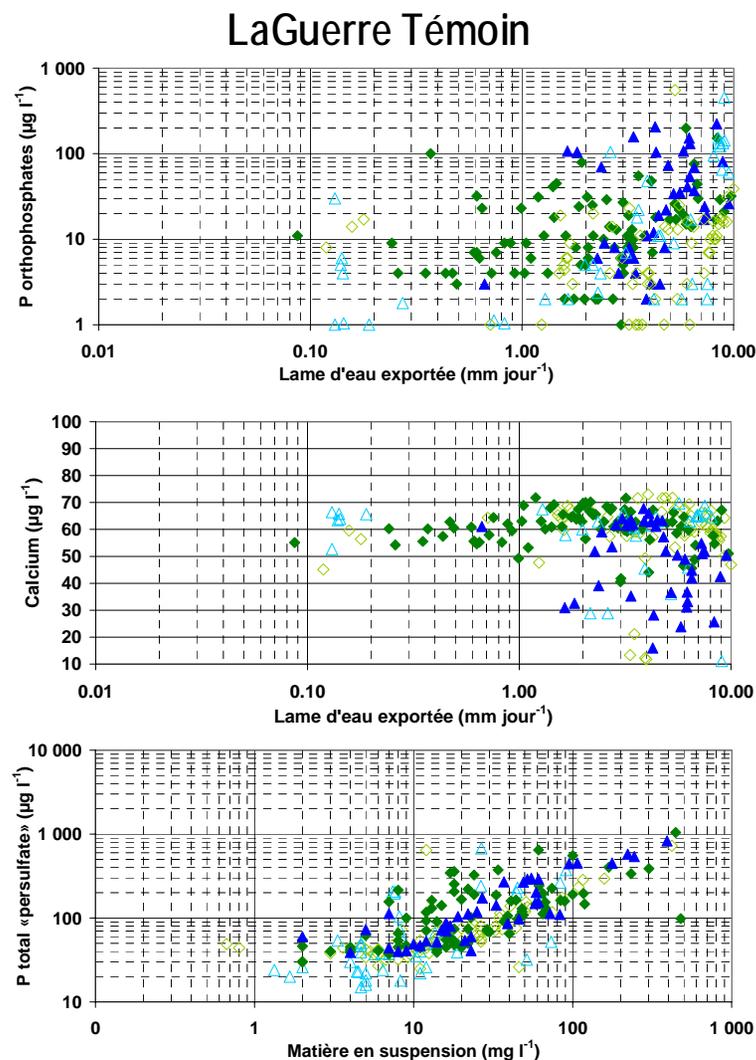
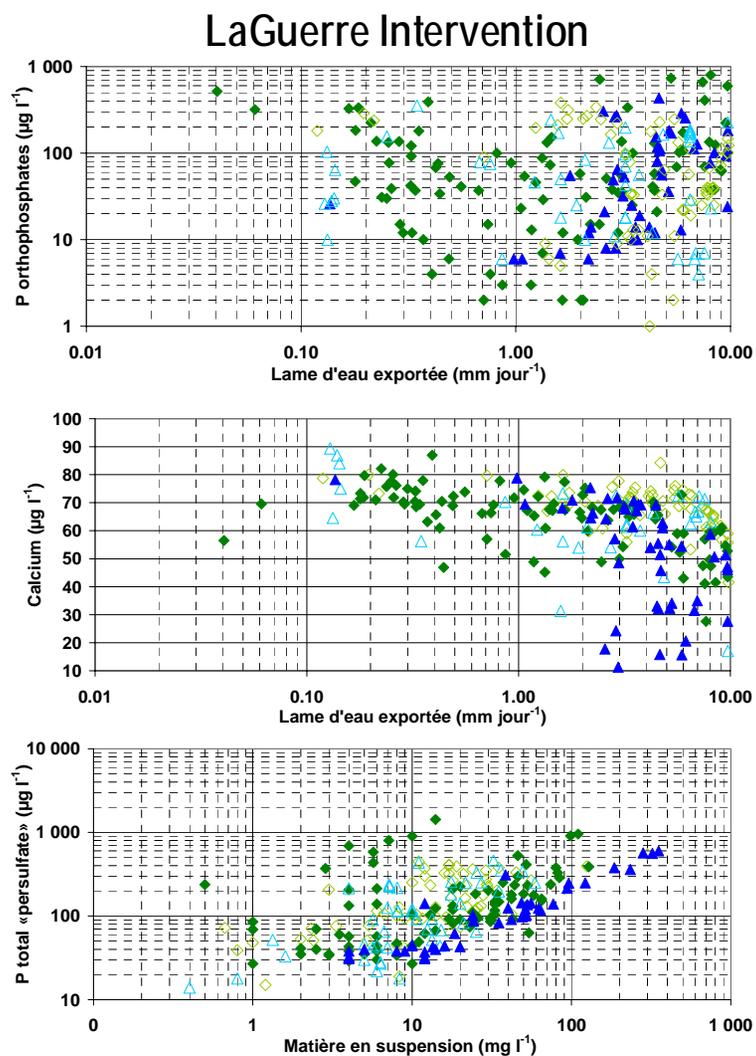
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.3.3 Variabilité des paramètres de qualité de l'eau en fonction du débit à l'exutoire pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) et la période d'évaluation (mars 2005 à novembre 2006) des bassins du réseau La Guerre.



ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

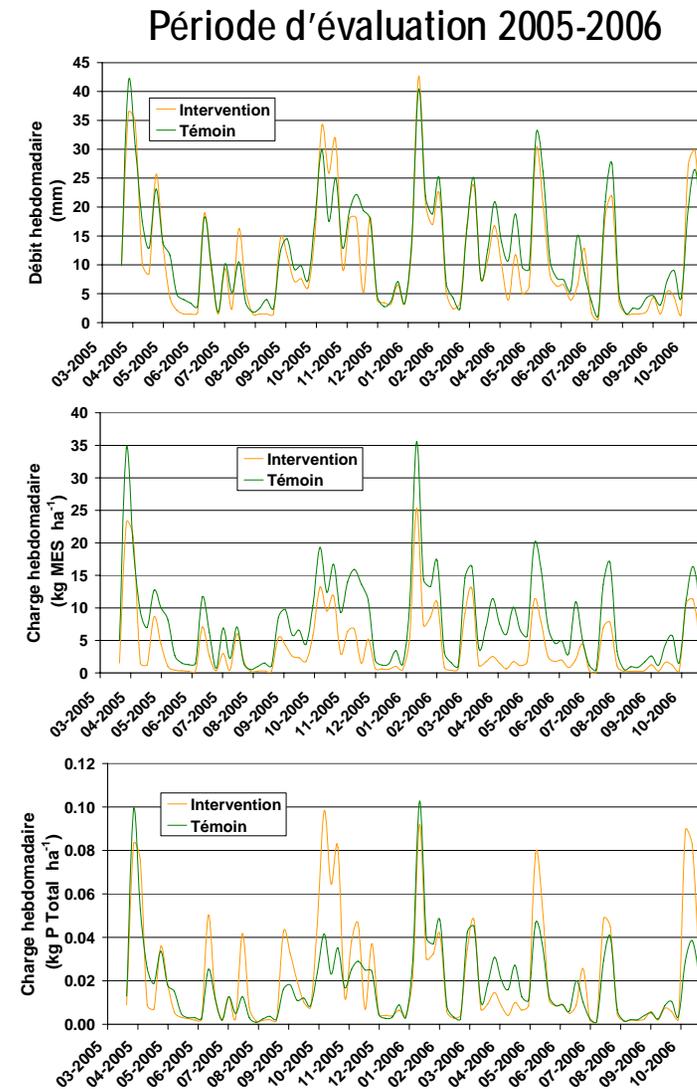
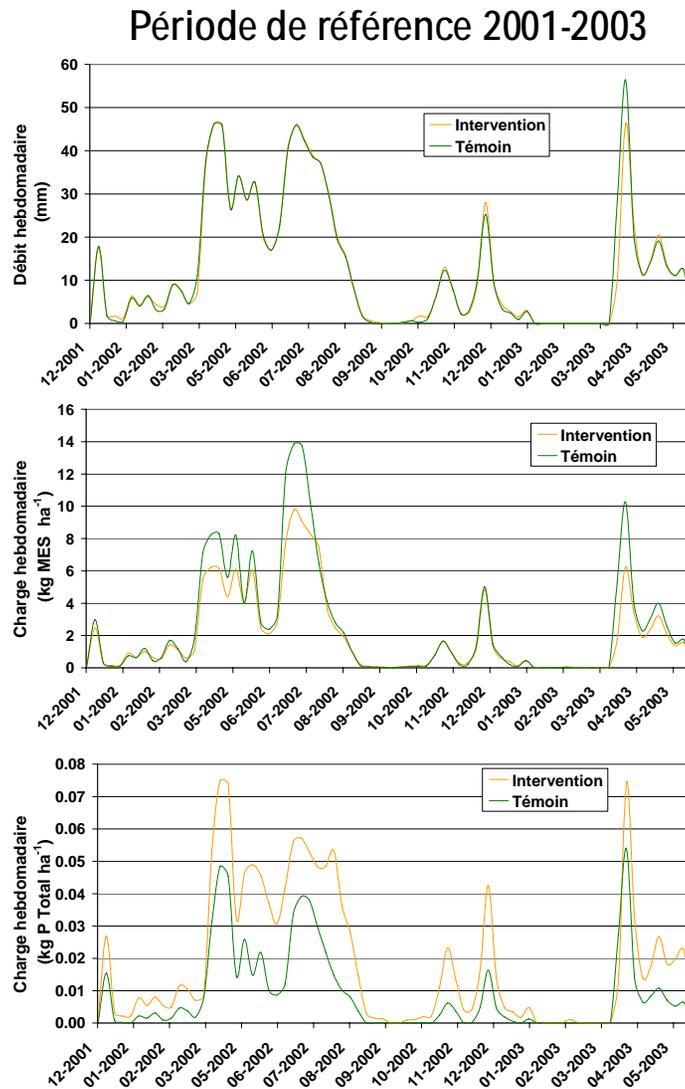
5.3.3 Variabilité des paramètres de qualité de l'eau en fonction du débit à l'exutoire pour la période de référence (novembre 2001 à mai 2003) et la période d'évaluation (mars 2005 à novembre 2006) des bassins du réseau La Guerre (suite).



◇ Production - Période de référence △ Recharge - Période de référence ◆ Production - Période d'évaluation ▲ Recharge - Période d'évaluation

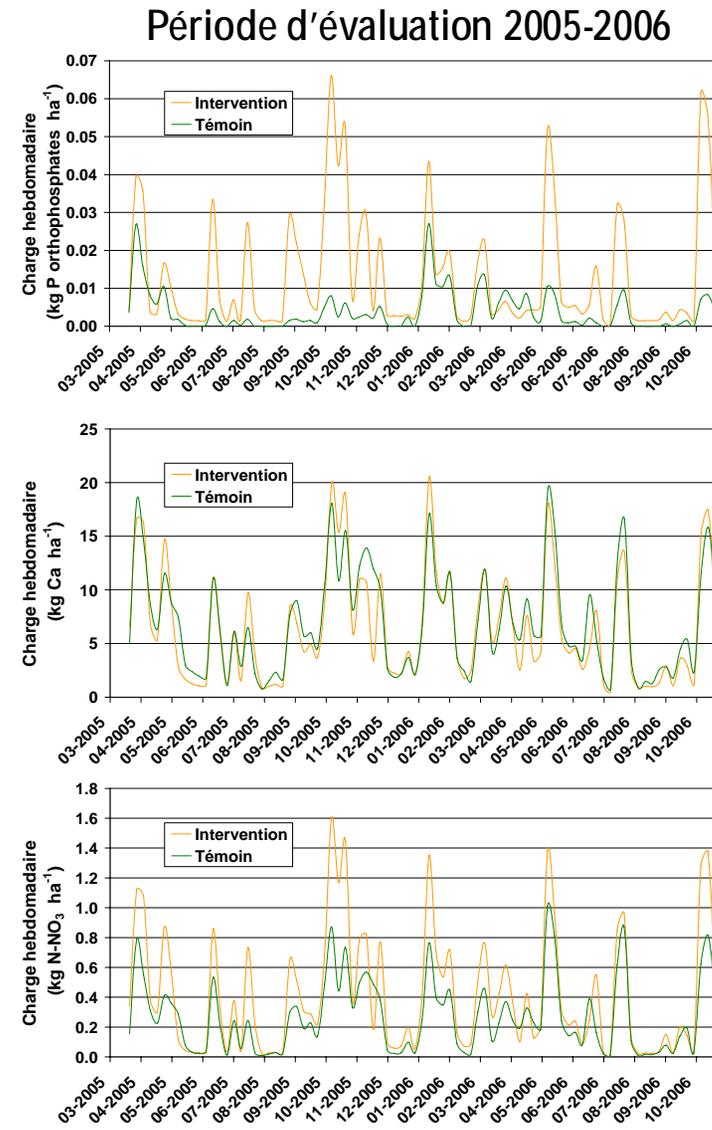
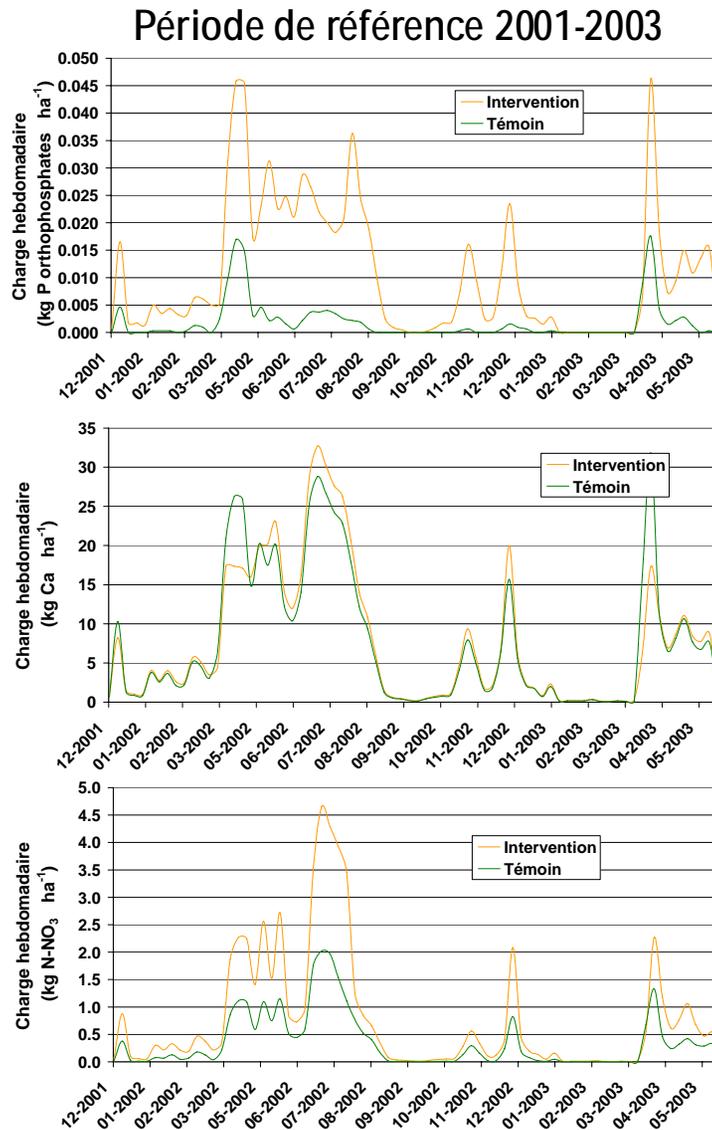
ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.3.4 Séries chronologiques des charges hebdomadaires en fonction du temps des bassins jumeaux du réseau La Guerre.



ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

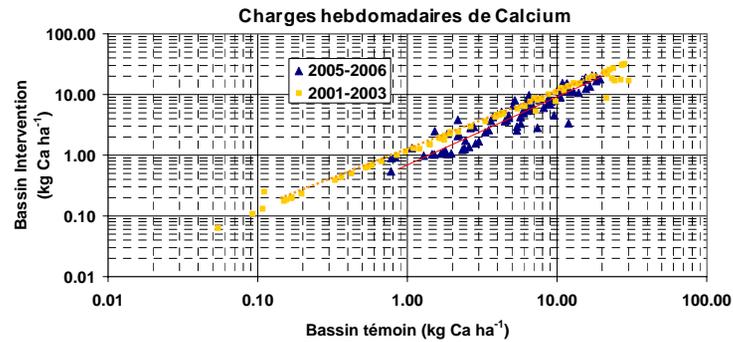
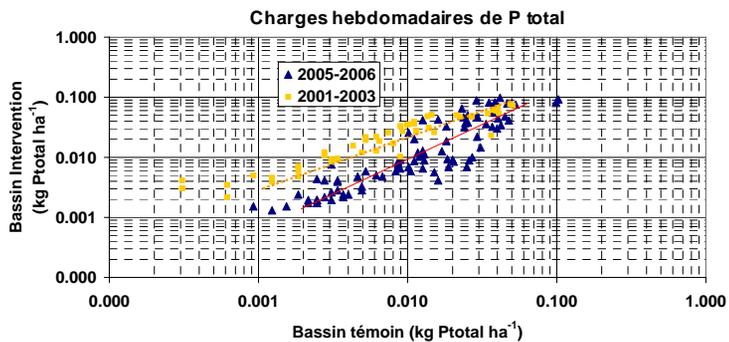
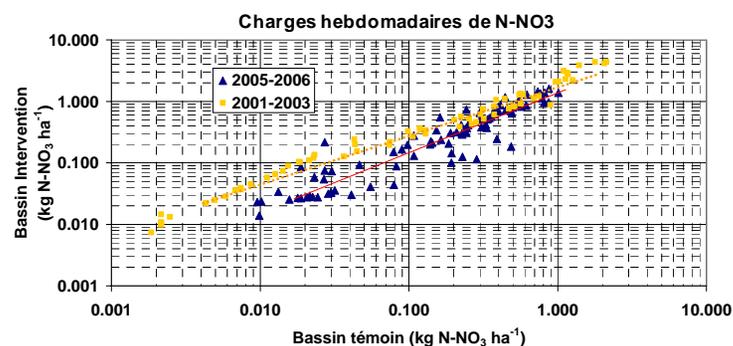
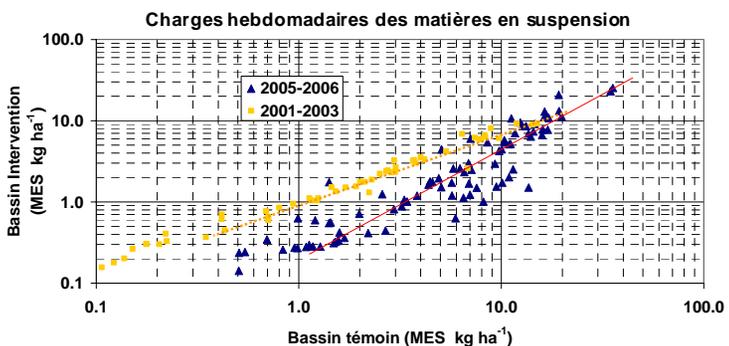
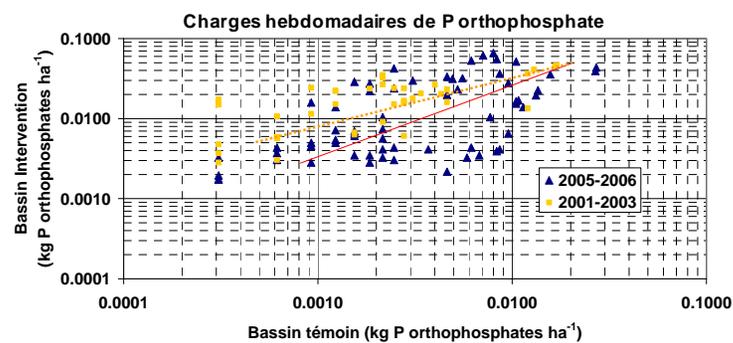
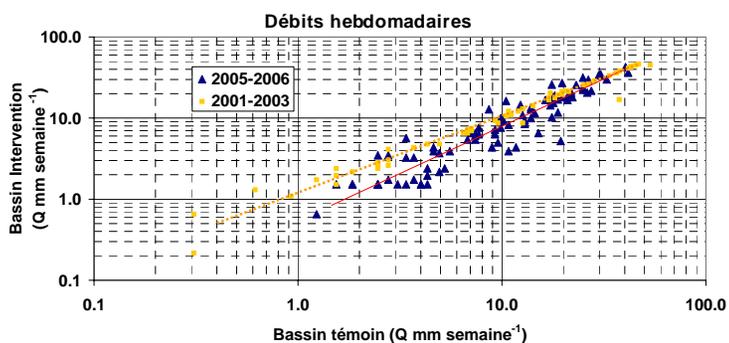
5.3.4 Séries chronologiques des charges hebdomadaires en fonction du temps des bassins jumeaux du réseau La Guerre (suite).



ANNEXE V. SUIVI HYDROMÉTRIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX.

5.3.5 Comparaisons des charges hebdomadaires des bassins jumeaux du réseau La Guerre (suite).

Charge hebdomadaire Témoin versus Intervention



5.4.1 - Sommaire des modélisations de flux des bassins versants du ruisseau Fourchette (suite).

Phosphore total

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.10	0.206	32	132	0.07
2	0.39	0.040	33	134	0.27
3	0.47	0.009	147	319	0.18
4	0.34	<0.001	365	228	0.06
Global			577	226	0.06

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.28	0.059	63	298	0.15
2	0.47	0.384	88	412	0.49
3	-0.05	0.770	146	459	0.16
4	0.54	<0.001	402	341	0.08
Global			700	364	0.09

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.14	0.074	62	131	0.08
2	-0.53	0.114	40	129	0.15
3	0.37	<0.001	532	315	0.09
4	0.43	0.001	429	259	0.11
Global			1064	257	0.06

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.33	0.021	84	191	0.21
2	1.10	0.089	110	495	0.55
3	0.33	0.001	604	438	0.12
4	0.21	0.075	420	260	0.13
Global			1217	333	0.09

Phosphore biodisponible

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.22	0.037	18	73	0.09
2	0.37	0.026	18	74	0.10
3	0.57	0.001	83	181	0.15
4	0.38	<0.001	251	157	0.08
Global			371	145	0.06

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.30	0.086	31	148	0.13
2	0.46	0.403	54	253	0.47
3	-0.02	0.911	76	239	0.19
4	0.46	<0.001	199	169	0.07
Global			361	187	0.09

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.15	0.080	46	97	0.08
2	-0.53	0.081	26	85	0.12
3	0.34	0.001	383	227	0.10
4	0.36	0.001	222	134	0.09
Global			678	164	0.07

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.34	0.015	44	99	0.21
2	1.09	0.056	54	241	0.54
3	0.32	0.002	324	235	0.13
4	0.26	0.046	185	115	0.14
Global			606	166	0.10

Phosphore total en solution

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.32	0.006	16	68	0.10
2	0.18	0.187	17	68	0.15
3	0.66	0.001	73	159	0.16
4	0.41	<0.001	202	126	0.09
Global			309	121	0.07

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.13	0.633	20	96	0.22
2	0.69	0.292	36	169	0.56
3	-0.05	0.787	47	149	0.25
4	0.47	0.001	97	82	0.12
Global			201	104	0.13

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.18	0.059	44	92	0.10
2	-0.48	0.075	20	64	0.13
3	0.31	0.003	333	197	0.12
4	0.29	0.001	152	92	0.07
Global			549	133	0.07

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.40	0.013	26	60	0.28
2	1.13	0.172	43	195	0.79
3	0.28	0.008	186	135	0.18
4	0.35	0.019	103	64	0.15
Global			358	98	0.14

5.4.1 - Sommaire des modélisations de flux des bassins versants du ruisseau Fourchette (suite).

Ortho-phosphates

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.38	0.004	14	57	0.12
2	0.14	0.258	13	54	0.13
3	0.76	<0.001	66	143	0.16
4	0.43	<0.001	186	116	0.10
Global			279	109	0.08

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.31	0.295	16	74	0.25
2	0.83	0.306	33	152	0.56
3	0.06	0.743	40	127	0.26
4	0.52	0.001	85	72	0.13
Global			173	90	0.14

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.19	0.063	38	80	0.11
2	-0.57	0.050	17	55	0.13
3	0.31	0.004	309	183	0.12
4	0.33	0.001	132	80	0.07
Global			496	120	0.08

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.42	0.013	22	49	0.31
2	1.21	0.174	39	177	0.83
3	0.34	0.004	163	118	0.19
4	0.42	0.013	85	53	0.18
Global			308	84	0.16

Matières en suspension

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.66	0.024	6326	26103	0.24
2	0.10	0.895	5352	21597	1.52
3	0.67	0.009	36488	79092	0.28
4	0.34	0.012	72686	45407	0.12
Global			120853	47351	0.13

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.01	0.976	15535	73242	0.12
2	0.14	0.780	24766	115523	0.44
3	0.13	0.526	44742	141013	0.20
4	0.53	<0.001	168590	142879	0.12
Global			253632	131845	0.10

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.21	0.239	4504	9461	0.18
2	-1.46	0.166	13288	42724	0.64
3	0.59	<0.001	94088	55647	0.16
4	0.68	0.002	124493	75171	0.19
Global			236373	57178	0.12

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.30	0.113	31953	72893	0.20
2	0.87	0.151	22686	102359	0.26
3	0.36	0.004	230326	167026	0.14
4	0.14	0.294	171689	106379	0.16
Global			456655	125011	0.10

Azote ammoniacal

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.16	0.373	21	85	0.18
2	0.11	0.838	194	781	0.19
3	0.41	0.089	120	261	0.60
4	0.09	0.595	631	394	0.15
Global			966	378	0.13

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.77	0.007	322	1520	0.16
2	-0.39	0.371	323	1505	0.28
3	-0.40	0.282	186	586	0.23
4	0.07	0.729	766	649	0.16
Global			1597	830	0.10

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.06	0.760	48	101	0.18
2	-0.68	0.098	155	497	0.13
3	0.30	0.049	139	82	0.15
4	0.17	0.297	489	295	0.17
Global			831	201	0.10

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.66	0.010	91	208	0.23
2	1.24	0.128	980	4423	0.94
3	-0.05	0.737	175	127	0.16
4	0.21	0.346	734	455	0.29
Global			1981	542	0.48

5.4.1 - Sommaire des modélisations de flux des bassins versants du ruisseau Fourchette (suite).

Nitrates

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	1.32	<0.001	1132	4669	0.17
2	-0.04	0.858	795	3209	0.14
3	0.00	0.966	3467	7514	0.06
4	-0.05	0.256	7747	4840	0.05
Global			13141	5149	0.04

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.15	0.322	708	3339	0.09
2	-0.02	0.802	720	3356	0.07
3	-0.07	0.239	3474	2944	0.06
4	0.05	0.613	1146	3613	0.10
Global			6048	3144	0.04

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.79	0.001	1133	2379	0.15
2	0.18	0.481	901	2896	0.14
3	-0.08	0.266	7187	4251	0.08
4	-0.22	0.117	5073	3063	0.15
Global			14293	3458	0.07

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.02	0.818	1619	3692	0.08
2	-0.06	0.852	511	2307	0.14
3	-0.16	<0.001	4437	3218	0.05
4	-0.15	0.073	2983	1848	0.08
Global			9550	2614	0.04

Calcium

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.02	0.626	17239	71127	0.06
2	-0.24	0.135	16219	65447	0.28
3	-0.25	<0.001	26701	57877	0.03
4	-0.38	<0.001	70177	43839	0.06
Global			130336	51066	0.05

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.18	0.002	6099	28753	0.04
2	0.04	0.700	6508	30355	0.09
3	-0.17	0.001	19257	16320	0.05
4	-0.15	0.002	6585	20755	0.04
Global			38449	19987	0.03

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.02	0.401	32010	67238	0.03
2	-0.02	0.918	17601	56591	0.11
3	-0.33	<0.001	84918	50224	0.03
4	-0.47	<0.001	53214	32132	0.09
Global			187743	45414	0.03

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.03	0.565	10615	24214	0.05
2	-0.11	0.609	3613	16301	0.09
3	-0.18	<0.001	26546	19250	0.02
4	-0.22	0.003	19967	12372	0.07
Global			60740	16628	0.03

5.4.2 - Sommaire des modélisations de flux des bassins versants du ruisseau Walbridge.

Phosphore total

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.12	0.578	38	50	0.23
2	0.93	<0.001	395	230	0.31
3	1.02	<0.001	233	98	0.14
Global			667	137	0.19

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.14	0.489	86	92	0.19
2	0.48	0.002	558	213	0.22
3	0.65	<0.001	411	131	0.10
Global			1055	158	0.13

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.28	0.072	79	68	0.17
2	0.65	<0.001	480	162	0.26
3	0.79	<0.001	329	120	0.11
Global			888	130	0.15

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.02	0.782	102	72	0.13
2	0.51	<0.001	737	163	0.23
3	0.62	<0.001	723	189	0.18
Global			1562	160	0.14

Phosphore biodisponible

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.02	0.949	24	31	0.20
2	0.89	<0.001	214	124	0.27
3	1.13	<0.001	132	55	0.12
Global			370	76	0.17

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.24	0.319	41	44	0.20
2	0.53	0.004	305	116	0.34
3	0.80	<0.001	187	60	0.11
Global			533	80	0.20

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.22	0.250	47	41	0.22
2	0.71	<0.001	324	109	0.24
3	0.59	<0.001	160	58	0.17
Global			531	78	0.15

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.00	0.961	57	40	0.14
2	0.43	0.005	382	84	0.30
3	0.77	<0.001	427	111	0.15
Global			865	89	0.15

Phosphore total en solution

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.06	0.817	16	21	0.28
2	0.82	<0.001	167	97	0.26
3	1.04	<0.001	94	40	0.12
Global			277	57	0.16

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.01	0.972	17	18	0.26
2	0.55	0.003	156	60	0.28
3	0.87	<0.001	92	29	0.13
Global			264	40	0.17

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.41	0.087	35	30	0.30
2	0.91	<0.001	312	105	0.30
3	0.59	<0.001	124	45	0.12
Global			470	69	0.20

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.00	0.981	31	22	0.20
2	0.48	0.009	266	59	0.38
3	0.44	<0.001	146	38	0.12
Global			442	45	0.23

5.4.2 - Sommaire des modélisations de flux des bassins versants du ruisseau Walbridge (suite).

Ortho-phosphates

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.09	0.790	14	18	0.34
2	0.84	<0.001	148	86	0.29
3	1.53	<0.001	81	34	0.16
Global			243	50	0.18

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.15	0.660	14	15	0.32
2	0.59	0.007	141	54	0.34
3	1.19	<0.001	81	26	0.19
Global			237	35	0.21

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.42	0.144	27	24	0.36
2	1.05	<0.001	302	102	0.35
3	0.66	<0.001	89	32	0.18
Global			418	61	0.26

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.07	0.636	23	16	0.25
2	0.51	0.013	228	50	0.43
3	0.61	<0.001	114	30	0.16
Global			364	37	0.27

Matières en suspension

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.75	0.030	3808	4959	0.36
2	1.24	<0.001	83422	48440	0.56
3	1.32	<0.001	53903	22657	0.18
Global			141133	28985	0.34

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.30	0.252	43825	47088	0.24
2	0.59	0.001	228159	87017	0.38
3	0.55	0.001	148753	47429	0.14
Global			420737	62900	0.21

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.39	0.074	10258	8924	0.22
2	0.54	0.029	66418	22437	0.39
3	1.22	<0.001	143648	52499	0.19
Global			220325	32184	0.17

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.01	0.947	29834	21109	0.19
2	0.64	0.002	193276	42644	0.27
3	0.69	<0.001	332389	86767	0.28
Global			555500	56820	0.19

Azote ammoniacal

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.04	0.902	81	106	0.57
2	0.57	0.003	235	136	0.37
3	0.82	<0.001	258	108	0.29
Global			574	118	0.22

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.22	0.095	40	44	0.14
2	0.43	0.001	167	64	0.13
3	0.50	0.062	514	164	0.18
Global			721	108	0.13

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.35	0.500	290	252	0.54
2	0.28	0.447	448	152	0.34
3	0.84	0.005	497	182	0.34
Global			1235	180	0.22

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.31	0.484	382	270	0.61
2	0.42	0.354	1202	265	0.65
3	1.02	<0.001	1001	261	0.21
Global			2585	264	0.33

5.4.2 - Sommaire des modélisations de flux des bassins versants du ruisseau Walbridge (suite).

Nitrates

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.40	0.009	6571	8558	0.13
2	0.11	0.105	14251	8275	0.11
3	-0.55	<0.001	17931	7537	0.10
Global			38754	7959	0.06

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.41	0.003	4382	4708	0.12
2	0.10	0.105	17174	6550	0.08
3	-0.45	0.008	18434	5878	0.10
Global			39989	5978	0.06

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.47	0.001	5554	4831	0.11
2	0.13	0.367	25543	8629	0.28
3	-0.25	0.021	12405	4534	0.12
Global			43502	6354	0.17

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.44	<0.001	4196	2968	0.17
2	0.19	0.110	25677	5665	0.15
3	-0.40	<0.001	10756	2808	0.12
Global			40629	4156	0.10

Calcium

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.02	0.819	82068	106878	0.08
2	-0.32	<0.001	127864	74246	0.04
3	-0.65	<0.001	179071	75268	0.08
Global			389002	79891	0.04

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.06	0.118	91093	97875	0.03
2	-0.29	<0.001	176433	67289	0.05
3	-0.69	<0.001	217968	69498	0.10
Global			485494	72581	0.05

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.09	0.115	106191	92378	0.05
2	-0.18	<0.001	206374	69717	0.06
3	-0.50	<0.001	161410	58991	0.07
Global			473974	69235	0.04

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.01	0.734	111176	78659	0.04
2	-0.31	<0.001	271705	59949	0.05
3	-0.61	<0.001	194850	50864	0.08
Global			577731	59094	0.04

5.4.3 - Sommaire des modélisations de flux des bassins versants de la rivière La Guerre.

Phosphore total

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.07	0.849	39	152	0.28
2	-0.69	0.153	215	183	0.22
3	-0.07	0.917	97	121	0.23
4	1.19	0.006	143	124	0.18
5	-0.60	0.752	149	162	0.28
Global			641	149	0.11

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.17	0.414	6	29	0.15
2	0.38	0.053	56	51	0.12
3	0.05	0.904	33	56	0.21
4	2.10	0.001	50	94	0.25
5	5.33	<0.001	71	104	0.23
Global			216	69	0.11

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.70	<0.001	72	114	0.13
2	0.57	0.057	228	169	0.25
3	1.00	0.008	100	103	0.17
4	0.22	0.837	327	407	0.20
5	0.02	0.982	163	281	0.34
Global			888	205	0.12

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.08	0.777	39	86	0.23
2	0.16	0.563	181	131	0.15
3	-0.38	0.477	133	147	0.26
4	0.36	0.672	57	157	0.14
5	0.31	0.789	105	279	0.37
Global			514	148	0.12

Phosphore biodisponible

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.11	0.795	30	119	0.29
2	-1.00	0.094	157	134	0.26
3	0.04	0.945	60	75	0.23
4	1.36	0.005	76	66	0.22
5	-0.76	0.737	101	110	0.31
Global			424	99	0.13

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.26	0.329	3	14	0.27
2	-0.20	0.461	22	20	0.17
3	1.31	0.029	13	23	0.29
4	2.10	<0.001	17	32	0.19
5	6.54	<0.001	37	55	0.27
Global			93	30	0.13

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.84	<0.001	37	58	0.12
2	0.58	0.059	140	104	0.31
3	1.28	0.012	56	57	0.23
4	0.80	0.538	218	271	0.26
5	-0.26	0.826	90	156	0.34
Global			540	125	0.15

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.08	0.690	17	38	0.14
2	0.06	0.764	59	43	0.11
3	-0.46	0.430	65	72	0.28
4	0.54	0.590	27	74	0.20
5	0.17	0.892	48	127	0.33
Global			216	62	0.12

5.4.3 - Sommaire des modélisations de flux des bassins versants de la rivière La Guerre (suite).

Phosphore total en solution

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.11	0.795	30	119	0.29
2	-0.86	0.213	154	131	0.29
3	-0.17	0.778	56	70	0.24
4	1.62	0.008	67	58	0.24
5	-0.67	0.775	97	106	0.33
Global			405	94	0.15

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.79	0.068	2	7	0.33
2	0.02	0.958	11	10	0.18
3	1.74	0.024	8	13	0.45
4	2.60	<0.001	9	16	0.21
5	7.93	<0.001	29	43	0.31
Global			58	19	0.18

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-1.13	<0.001	49	77	0.18
2	0.95	0.029	158	117	0.34
3	1.25	0.011	52	54	0.22
4	0.43	0.742	230	286	0.27
5	0.74	0.683	66	114	0.70
Global			554	128	0.17

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.06	0.828	8	18	0.22
2	0.11	0.710	32	23	0.20
3	-0.18	0.828	42	47	0.49
4	-0.14	0.906	21	58	0.29
5	0.39	0.717	36	94	0.23
Global			138	40	0.17

Ortho-phosphates

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.07	0.866	27	105	0.31
2	-1.31	0.083	146	124	0.29
3	-0.24	0.733	52	65	0.26
4	1.88	0.007	54	47	0.28
5	-1.37	0.671	91	99	0.36
Global			370	86	0.16

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.81	0.049	1	5	0.31
2	-0.28	0.460	7	7	0.23
3	1.50	0.074	7	12	0.49
4	3.65	<0.001	5	9	0.32
5	9.00	<0.001	24	36	0.37
Global			45	14	0.22

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-1.30	<0.001	44	70	0.20
2	1.02	0.040	146	109	0.36
3	1.63	0.004	44	46	0.25
4	0.57	0.687	219	273	0.28
5	-0.56	0.685	69	119	0.35
Global			523	121	0.16

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.04	0.905	6	13	0.28
2	0.31	0.344	21	15	0.14
3	-0.54	0.569	42	46	0.46
4	0.14	0.916	18	51	0.33
5	-0.22	0.839	27	73	0.25
Global			114	33	0.19

5.4.3 - Sommaire des modélisations de flux des bassins versants de la rivière La Guerre (suite).

Matières en suspension

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.21	0.444	3077	12023	0.24
2	0.25	0.694	14715	12538	0.28
3	-0.18	0.828	13249	16596	0.32
4	2.44	0.001	24441	21257	0.36
5	1.68	0.397	12340	13442	0.31
Global			67822	15788	0.17

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.15	0.684	1805	8142	0.22
2	-0.42	0.330	15375	14116	0.25
3	0.49	0.408	12424	21022	0.23
4	2.97	0.001	18521	34721	0.34
5	5.50	<0.001	12034	17779	0.19
Global			60158	19330	0.14

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.17	0.602	8752	13865	0.21
2	0.51	0.294	45519	33838	0.16
3	0.96	0.161	26722	27508	0.47
4	-0.07	0.957	40480	50436	0.16
5	0.64	0.687	42263	73041	0.52
Global			163736	37822	0.17

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.16	0.689	16852	37670	0.30
2	0.23	0.586	98728	71721	0.16
3	-1.13	0.109	49388	54856	0.21
4	0.87	0.383	18285	50542	0.19
5	1.02	0.549	36183	96030	0.52
Global			219436	63369	0.13

Azote ammoniacal

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.08	0.852	32	125	0.86
2	-0.26	0.627	84	72	0.36
3	0.76	0.567	176	220	0.48
4	2.16	0.001	35	30	0.20
5	-1.23	0.691	274	298	0.43
Global			601	140	0.25

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.32	0.300	6	25	0.31
2	-0.23	0.395	36	33	0.19
3	0.32	0.249	12	20	0.19
4	2.30	0.002	15	28	0.25
5	7.65	0.001	98	144	0.36
Global			166	53	0.22

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.51	0.435	22	35	0.20
2	1.15	0.153	58	43	0.17
3	1.62	0.076	84	86	0.37
4	2.03	0.644	99	123	0.57
5	-1.76	0.350	122	210	0.41
Global			384	89	0.21

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-1.26	0.089	23	50	0.66
2	0.13	0.812	40	29	0.14
3	-0.85	0.505	207	229	0.56
4	-2.11	0.464	15	41	0.22
5	-3.48	0.179	77	203	0.38
Global			360	104	0.34

5.4.3 - Sommaire des modélisations de flux des bassins versants de la rivière La Guerre (suite).

Nitrates

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.00	0.995	1125	4398	0.14
2	0.46	0.418	5047	4300	0.18
3	-0.16	0.747	4239	5310	0.13
4	1.07	0.024	11620	10106	0.18
5	0.80	0.678	4500	4901	0.30
Global			26531	6176	0.10

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.32	0.300	186	841	0.08
2	-0.23	0.395	2868	2633	0.22
3	0.32	0.249	1308	2213	0.20
4	2.30	0.002	2615	4901	0.14
5	7.65	0.001	1625	2401	0.17
Global			8601	2764	0.10

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.97	<0.001	1375	2178	0.11
2	0.12	0.365	6360	4728	0.10
3	-0.25	0.386	3608	3715	0.10
4	1.33	0.100	3548	4420	0.13
5	1.36	0.141	1606	2776	0.22
Global			16497	3811	0.06

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.47	0.159	320	716	0.20
2	0.41	0.011	3523	2559	0.07
3	0.50	0.078	1602	1779	0.13
4	1.23	0.029	1327	3669	0.09
5	0.09	0.879	727	1931	0.12
Global			7500	2166	0.05

Calcium

Bassin Intervention - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.03	0.443	19749	77169	0.03
2	0.01	0.891	83211	70900	0.02
3	-0.73	0.307	48132	60294	0.10
4	-0.76	<0.001	81783	71129	0.06
5	0.90	0.710	34369	37436	0.36
Global			267244	62212	0.05

Bassin Témoin - période de référence

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.09	0.082	14419	65048	0.03
2	-0.04	0.682	66972	61488	0.04
3	-0.07	0.727	33105	56018	0.07
4	-0.39	<0.001	33583	62957	0.03
5	-4.70	<0.001	38419	56762	0.16
Global			186499	59927	0.04

Bassin Intervention - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	-0.02	0.527	43975	69666	0.03
2	-0.02	0.695	87484	65034	0.02
3	-0.37	0.002	64808	66714	0.06
4	-0.17	0.563	41710	51969	0.05
5	1.05	0.077	22321	38577	0.13
Global			260299	60128	0.02

Bassin Témoin - période d'évaluation

Strate	Pente de la régression C/Q		Charge (kg)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV
	Pente	Signif			
1	0.01	0.724	25920	57942	0.02
2	-0.06	0.115	86428	62785	0.02
3	0.19	0.435	44773	49730	0.09
4	0.09	0.677	20397	56381	0.04
5	-0.06	0.870	15401	40875	0.09
Global			192919	55712	0.02

ANNEXE VI. COÛTS ET BÉNÉFICES ASSOCIÉS AUX AMÉNAGEMENTS HYDRO-AGRICOLES.

6.1 Coûts et bénéfices associés aux aménagements hydro-agricoles dans le bassin *Intervention* du ruisseau Fourchette.

Coûts et descriptions des aménagements

Adoucissement du talus à la branche 52 - 1675 mètres		Autres aménagements subventionnés Prime-Vert	
Excavations Gaétan Marquis	1 722.00 \$	Tranchées filtrantes (3) et l'avaloir #1	
Régalage	540.00 \$	Pelle hydraulique 8 hres @ 65 \$/hre	520.00 \$
Ensemencement	775.00 \$	Transport de roches 3 hres @ 45 \$/hre	135.00 \$
Déversoir engazonnée (plaque)	300.00 \$	Main d'œuvre 8 hres @ 15 \$/hre	120.00 \$
Biogénie (Aménagement forestiers et fauniques Montérégien)	7 210.80 \$	Drains pour tranchée filtrante et sortie	150.00 \$
	10 547.80 \$	Gravier pour tranchée filtrante	50.00 \$
		Avaloir et conduite + grille	400.00 \$
Entretien et aménagement de la branche 53, (MRC Beauce Nord - 1250 mètres)		Avaloir #2	
Locations de pelles 55hres @ 110\$/hre	6 050.00 \$	Pelle hydraulique 4 hres @ 65 \$/hre	260.00 \$
Location de 2 camions	3 300.00 \$	Main d'œuvre 4 hres @ 15 \$/hre	60.00 \$
Achat de plants myrique baumier	1 240.00 \$	Avaloir et conduite	350.00 \$
Plantations	320.00 \$	Perrés à la ferme #1	
Achat de semences	220.00 \$	Pelle hydraulique 12 hres @ 65 \$/hre	780.00 \$
Achat de pierre	300.00 \$	Transport de roches 6 hres @ 45 \$/hre	270.00 \$
Régalage des déblais	2 020.00 \$	Voie d'eau #1 et perré	
Transport des déblais	920.00 \$	Pelle hydraulique 8 hres @ 65 \$/hre	520.00 \$
	14 370.00 \$	Main d'œuvre 2 x 8 hres @ 15 \$/hre	240.00 \$
-subvention (remboursement de taxes 70% de 11 890\$)	10 059.00 \$	Drains pour voie d'eau et sortie	200.00 \$
		Transport de matériel	25.00 \$
Soustraction de 50% du coût total lié à l'entretien	7 185.00 \$	Voie d'eau #2 et perrés	
Coût associé à la protection des talus et mitigations	7 185.00 \$	Drains pour voie d'eau et sortie	300.00 \$
Bande riveraine 4 490 m arbustive et 2 200 m arborescente		Pelle hydraulique 5 hres @ 65 \$/hre	325.00 \$
Préparation de terrain et pose du paillis	2 130.00 \$	Main d'œuvre 2 x 5 hres @ 15 \$/hre	150.00 \$
Achat du paillis + location dérouleuse	2 015.00 \$	Voie d'eau #3	
Achats de plants	4 149.80 \$	Drains pour voie d'eau et sortie	150.00 \$
Plantation (102 hres @ 15 \$/hre)	1 530.00 \$	Pelle hydraulique 3 hres @ 65 \$/hre	195.00 \$
Grilles pour protéger arbres	615.00 \$	Main d'œuvre 2 x 3 hres @ 15 \$/hre	90.00 \$
	10 439.80 \$	Transport de roches	50.00 \$
Entretien 3 ans		Avaloirs #3, #4, #5 et #6	
Fauche de chaque coté 1 fois par année		Pelle hydraulique 6.5 hres @ 65 \$/hre	422.50 \$
3 jours @ 2 hommes @ 20 \$/hre X 10 hrs-jr X 3 ans	3 600.00 \$	Main d'œuvre 6 hres @ 15 \$/hre	90.00 \$
	3 600.00 \$	Avaloir et conduite	1 400.00 \$
		Perrés à la ferme #3	
		Transport de roches	150.00 \$
		Pelle hydraulique 5 hres @ 65 \$/hre	520.00 \$
		Main d'œuvre 6 hres @ 15 \$/hre	120.00 \$
			8 042.50 \$
		Subvention	5 629.75 \$
			Grand total des coûts associés aux aménagements hydro-agricoles :
			24 651 \$

Bénéfices liés à l'entretien du réseau hydrographique

Cours d'eau municipaux	
Hypothèses: Augmentation de durée de vie de 15 à 30 ans.	
Longueur des cours d'eau :	4 550 mètres
Coût d'entretien (10 000 \$/km) :	45 500 \$
Coût annuel d'entretien avant intervention	
1 nettoyage au 15 ans	3 033 \$ par an
Coût annuel d'entretien après intervention	
1 nettoyage au 30 ans	1 517 \$ par an
Économie annuelle :	1 517 \$ par an
Retour de l'investissement :	21.5 ans
(Sans loyer de l'argent)	

6.2 Coûts et bénéfices associés aux aménagements dans le bassin *Intervention* du ruisseau Walbridge.

Coûts et descriptions des aménagements

Stabilisation du fossé ensablé		
Location de pelle	- creusage du bassin	156 \$
	- nettoyage du fossé	156 \$
Génie-végétaux	Labon - géotextile, crampe	1 489 \$
	plants	2 284 \$
	Main d'œuvre (2 personne x 2 semaine)	1 680 \$
	VTT	100 \$
Semence		120 \$
Régilage		274 \$
		6 259 \$
Bandes riveraines		
Achat	paillis	480 \$
	Plants	153 \$
	Plants	1 718 \$
Plantation à forfait		1 404 \$
Location rotoculteur		484 \$
Préparation-Main d'œuvre		468 \$
Tracteur et dérouleuse (forfait)		450 \$
Plantation - main d'œuvre		336 \$
		5 493 \$
Entretien 3 ans		
Fauche de chaque coté 1 fois par année		
1 jours @ 1 hommes @ 20 \$/hre X 7 hrs-jr X 3 ans		420 \$
Avaloirs et tranchées filtrantes Ferme #1		
Machinerie lourde, à forfait		550 \$
Main d'œuvre		160 \$
Matériel-Avaloir		350 \$
Transport de roche		200 \$
Matériel-Drains		300 \$
		1 560 \$
Avaloirs à la ferme #4		
8 avaloirs installés dans les champs		3 100 \$
		3 100 \$
Entretien et aménagement du cours d'eau (MRC Brome Missisquoi)		
Engazonnement	main d'œuvre et semence	500 \$
Perré (7)	4 voyage de camions	1 000 \$
	Pelle hydraulique	500 \$
Préparation de terrain (producteurs)		300 \$
Réfection du cours d'eau		11 350 \$
		13 650 \$
Soustraction de 50% du coût total lié à l'entretien		5 675 \$
Coût associé à la protection des talus et mitigations		7 975 \$
Grand total des coûts associés aux aménagements hydro-agricoles :		24 651 \$

Bénéfices liées à l'entretien du réseau hydrographique

Cours d'eau municipaux	
<u>Hypothèses: Augmentation de durée de vie de 20 à 30 ans.</u>	
Longueur des cours d'eau:	11,89 km
Longueur entretenue (50%):	5 945 mètres
Coût d'entretien (10 000 \$/km) :	59 450 \$
Coût annuel d'entretien avant intervention	
1 nettoyage au 20 ans	2 973 \$ par an
Coût annuel d'entretien après intervention	
1 nettoyage au 30 ans	1 982 \$ par an
Économie annuelle :	991 \$ par an
Fossés	
<u>Hypothèses: Augmentation de durée de vie 7,5 à 15 ans.</u>	
Longueur de fossé :	326 mètres
Coût d'entretien du fossé :	500 \$
Coût annuel d'entretien avant intervention	
1 nettoyage au 7,5 ans	67 \$ par an
Coût annuel d'entretien après intervention	
1 nettoyage au 15 ans	33 \$ par an
Économie annuelle :	33 \$ par an

Retour sur l'investissement

Économie annuelle reliée à l'entretien des cours d'eau:	991 \$ par an
Économie annuelle reliée à l'entretien des fossés:	33 \$ par an
Économie annuelle total :	1 024 \$ par an
Retour sur l'investissement :	24.1 ans
(Sans loyer de l'argent)	

Problématiques principales et correctifs aux problèmes :

Ravins et dépôt à certains endroits --> seuil, perré, adoucissement des talus et bande riveraine.
 Concentration d'eau de ruissellement dans les dépressions --> tranchées filtrantes ou avaloirs.
 Accumulation de sédiment au fossé --> bassin de sédimentation

6.1.1 Coûts et bénéfices associés aux aménagements hydro-agricoles dans le bassin *Intervention* de la rivière La Guerre.

Coûts et descriptions des aménagements

Bande riveraine le long du réseau routier (municipalité de Saint-Anicet)	
Plantations exécuté par une entreprise spécialisé (7 650 arbustes et 240 arbres)	12 833.00 \$
Aménagement et corrections au réseau routier en 2004 :	1 322.00 \$
Préparations et paillis	885.00 \$
Plantation d'arbres Marius Trépanier 2004 :	150.00 \$
Achats de plants de chênes rouges	550.00 \$
Colerette + remplacement de plans	500.00 \$
	16 240.00 \$
Brise-vent 2004	
Préparations du sol :	130.00 \$
Achat de plants :	150.00 \$
Plantation d'arbres 2004 :	150.00 \$
	430.00 \$
Génie végétaux et bande riveraine à la branche 16 de la rivière LaGuerre	
Adoucissement du talus avec pelle hydraulique	2 475.00 \$
Régalage et transport des déblais	730.00 \$
Achat et disposition du paillis (paille)	500.00 \$
Achat, préparations avec paillis en jute pour 20 000 arbustes	30 000.00 \$
	33 705.00 \$
Perré	
Location de pépinière :	90.00 \$
Main d'œuvre et matériaux	120.00 \$
	210.00 \$
Entretien 3 ans	
Fauche de chaque coté 1 fois par année 2 jours @ 2 hommes @ 20 \$/hre X 10 hrs-jr X 3 ans	2 400.00 \$
	2 400.00 \$
Grand total des coûts associés aux aménagements hydro-agricoles	52 555.00 \$

Bénéfices liées à l'entretien du réseau hydrographique

Cours d'eau municipaux	
<u>Hypothèses: Augmentation de durée de vie de 20 à 30 ans.</u>	
Longueur des cours d'eau :	5 570 mètres
Coût d'entretien (10 000 \$/km) :	55 700 \$
Coût annuel d'entretien avant intervention	
1 nettoyage au 15 ans	3 713 \$ par an
Coût annuel d'entretien après intervention	
1 nettoyage au 30 ans	1 857 \$ par an
Économie annuelle :	1 857 \$ par an
Fossés	
Longueur de fossés :	4 950 mètres
Coût d'entretien du fossés (2 850 \$/km) :	14 108 \$
Coût annuel d'entretien avant intervention	
1 nettoyage au 15 ans	941 \$ par an
Coût annuel d'entretien après intervention	
1 nettoyage au 30 ans	470 \$ par an
Économie annuelle :	470 \$ par an

Retour sur l'investissement

Économie annuelle reliée à l'entretien des cours d'eau:	1 857 \$ par an
Économie annuelle reliée à l'entretien des fossés:	470 \$ par an
Économie annuelle total :	2 327 \$ par an
Retour sur l'investissement : (Sans loyer de l'argent)	22.6 ans

ANNEXE VII. PHOTOGRAPHIES DES SITES EXPÉRIMENTAUX DES TROIS RÉGIONS À L'ÉTUDE.

7.1 Photographies du bassin *Intervention* du ruisseau Fourchette.



7.1 Photographies du bassin *Intervention* du ruisseau Fourchette (suite).



7.2 Photographies du bassin *Intervention* du ruisseau Walbridge.



7.3 Photographies du bassin *Intervention* de la rivière La Guerre.



7.1 Photographies du bassin *Intervention* de la rivière La Guerre (suite).

