

# RAPPORT FINAL

## RÉSEAU D'ACTIONS CONCERTÉES EN BASSINS VERSANTS AGRICOLES



**Projet de recherche et développement présenté au  
Fonds d'action québécois pour le développement durable et son partenaire  
financier le gouvernement du Québec**

(Projet no. 212)



Préparé par:

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

En Partenariat avec:



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



Québec, Janvier 2004

ISBN – 2-922851-27-3  
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec, 2004  
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Canada, 2004  
© IRDA

## EQUIPE 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 Thibodeau  
François Cadrin  
Sylvain Gascon  
Les producteurs et les bénévoles des bassins versants du réseau LaGuerre

### **Dura-Club**

Evelyne Barriault  
Elizabeth Vachon  
Les producteurs et les bénévoles des bassins versants du réseau Walbridge

### **Ministère de l'agriculture, pêches 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

## TABLE DES MATIÈRES

1.0 Description sommaire du projet .....	5
2.0 Déroulement des travaux .....	6
2.1 Sélection des bassins versants expérimentaux .....	7
2.2 Diagnostics et atlas agroenvironnementaux .....	8
2.3 Bilan agronomique .....	9
2.4 Jaugeage et relevés hydrométriques .....	10
2.5 Suivi de la qualité de l'eau .....	11
2.6 Aménagement des bassins versants <i>Intervention</i> .....	18
3.0 Communications et activités scientifiques .....	21
4.0 Suites au projet .....	22
Références citées .....	23
Annexes .....	24
1.0 Caractérisation bio-physique des bassins versants .....	24
2.0 Description des tables de données agronomiques .....	28
3.0 Suivi hydrométrique et de la qualité de l'eau aux exutoires des bassins versants expérimentaux .....	30
3.1 Bassin <i>Intervention</i> du Ruisseau Walbridge .....	30
3.1.1 Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de calibration (novembre 2001 à mai 2003) des paires de bassins jumeaux du réseau. ....	30
3.1.2 Variabilité des paramètres de qualité de l'eau en fonction du débit à l'exutoire pour la période de calibration (novembre 2001 à mai 2003) des bassins jumeaux du réseau. ....	33
3.1.3 Séries chronologiques et comparaisons des charges hebdomadaires des bassins jumeaux du réseau. ....	35

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

3.0	Suivi hydrométrique et de la qualité de l'eau aux exutoires des bassins versants expérimentaux .....	30
3.2	Bassin <i>Intervention</i> de la Rivière Fourchette .....	38
3.2.1	Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de calibration (novembre 2001 à mai 2003) des paires de bassins jumeaux du réseau. ....	38
3.2.2	Variabilité des paramètres de qualité de l'eau en fonction du débit à l'exutoire pour la période de calibration (novembre 2001 à mai 2003) des bassins jumeaux du réseau. ....	41
3.2.3	Séries chronologiques et comparaisons des charges hebdomadaires des bassins jumeaux du réseau. ....	43
3.3	Bassin <i>Intervention</i> de la Rivière LaGuerre .....	46
3.3.1	Observations ponctuelles de qualité de l'eau et du débit à l'exutoire par ordre chronologique d'échantillonnage pour la période de calibration (novembre 2001 à mai 2003) des paires de bassins jumeaux du réseau. ....	46
3.3.2	Variabilité des paramètres de qualité de l'eau en fonction du débit à l'exutoire pour la période de calibration (novembre 2001 à mai 2003) des paires de bassins jumeaux du réseau. ....	49
3.3.3	Séries chronologiques et comparaisons des charges hebdomadaires des bassins jumeaux du réseau. ....	51
3.4	Sommaires des modélisations de flux des trois paires de bassins jumeaux du réseau. ....	54
4.0	Diagnostic et aménagements hydro-agricoles réalisés dans les bassins <i>Intervention</i> du réseau. ....	63
4.1	Imagerie multi-spectrale et micro-topographie .....	63
4.2	Aménagements hydro-agricoles réalisés en 2003 .....	68
5.0	Illustrations des chantiers d'aménagement hydro-agricole .....	74
5.1	Bassin <i>Intervention</i> du Ruisseau Walbridge .....	74
5.2	Bassin <i>Intervention</i> de la Rivière Fourchette .....	78
5.3	Bassin <i>Intervention</i> de la Rivière LaGuerre .....	85
6.0	Revue de presse .....	88
7.0	Utilisation de CD ROM .....	94
7.1	Description des icônes .....	94
7.2	Consultation des couches d'information .....	95
7.3	Image aéroportée multispectrale .....	97
7.4	Indice de brillance (IB) .....	98
7.5	Micro-topographie .....	99

# RÉSEAU D'ACTIONS CONCERTÉES EN BASSINS VERSANTS AGRICOLES

**Projet de recherche et développement**  
**Réalisé avec le soutien du**  
**Fonds d'action québécois pour le**  
**développement durable**  
**(Projet no. 212)**

## RAPPORT FINAL

Le présent projet a fait l'objet d'une aide financière du Fonds d'action québécois pour le développement durable à l'égard de l'intégration et la promotion du développement durable (volet I) et cible l'axe de la gestion des eaux en appuyant :

- l'acquisition et la diffusion de connaissances dans le domaine des eaux de surface, notamment sur la dynamique du transport diffus de nutriments et de sédiments en bassins versants agricoles ;
- la démonstration de solutions durables aux problématiques de contamination diffuse, en supportant la mise en œuvre de plans intégrés de gestion de l'eau à l'échelle de petits bassins.

### **Partenaires de réalisation**

- L'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA Inc.);
- Le Club de fertilisation de la Beauce ;
- Le Dura-Club ;
- Le Club du bassin LaGuerre ;
- Le Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec, Directions régionales de Chaudières-Appalaches, Montérégie-Est, Montérégie-Ouest et Direction de l'environnement et du développement durable;
- Le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ).

### **1.0 Description sommaire du projet**

L'IRDA et ses partenaires ont développé un réseau dédié à l'appui technique et scientifique d'initiatives communautaires de mise en valeur de bassins versants agricoles dans trois régions agricoles du Québec, soient en Chaudières-Appalaches (Etchemin), en Montérégie-Est (Rivières-aux-Brochets) et Montérégie-Ouest (Rivière LaGuerre). Ces actions concertées de gestionnaires d'entreprises agricoles, appuyés par leurs conseillers de clubs-conseils en agroenvironnement et les ressources professionnelles de l'IRDA, du MAPAQ et du CEHQ, sont ciblées sur la prévention des sources agricoles diffuses de contamination des eaux de surface.

Le principal objectif du réseau d'étude en bassins versants est de quantifier les réductions de la charge diffuse de contamination d'origine agricole suivant une intervention agroenvironnementale concertée des entreprises agricoles et ciblée sur la gestion du ruissellement de surface. Le dispositif expérimental en bassins versants jumeaux (bassin *Intervention* et bassin *Témoin*) permet de quantifier l'effet des interventions malgré les conditions hydrologiques variables pendant la période d'étude.

Les résultats et retombées attendus du réseau pour chacun des regroupements de bassin consistent en :

- une caractérisation des régimes d'exportations diffuses de chacun des six bassins versants expérimentaux, comportant une quantification et une description de la variabilité temporelle des charges de sédiments, de l'azote et du phosphore;
- une représentation spatiale à l'échelle du bassin des caractéristiques biophysiques et des systèmes de production pertinentes à l'explication des charges de contaminants;
- un développement d'expertise à l'échelle locale dans les aménagements hydro-agricoles de conservation, notamment l'aménagement riverain et les ouvrages de contrôle du ruissellement de surface;
- un suivi dans le temps des retombées environnementales des mesures de prévention des charges diffuses de contaminants;
- l'amélioration de la qualité du milieu et de la qualité de vie des familles d'exploitants agricoles et des communautés en aval;
- la promotion de l'approche communautaire en matière de gestion de l'eau en milieu agricole.

La réalisation du projet comporte trois phases, dont les deux premières ont profité du financement du Fonds d'action québécois pour le développement durable :

- La phase de calibration des bassins a supporté une description du fonctionnement hydrologique et des régimes d'exportation de sédiments et de nutriments des bassins *Témoin* et *Intervention* au moyen de suivis hydrométriques et de la qualité de l'eau à leurs exutoires. Complétée au printemps 2003, cette première phase du projet a permis de contraster et d'établir des relations significatives dans les exportations diffuses de sédiments et de nutriments en provenance des deux bassins. Ces dernières serviront de base comparative pour détecter et chiffrer les différences dans les régimes d'exportation des bassins suivant l'implantation des pratiques et aménagements agroenvironnementaux dans le bassin *Intervention* (phase d'évaluation).
- La phase d'aménagement du bassin 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 interventions réalisées au cours de l'année 2003 consistent notamment en l'implantation de 13 km de bande riveraine arbustive, la stabilisation par bio-génie de 3 km de sections de ruisseau, la plantation de 5.5 km de haies brise-vent et la réfection de 2.6 km de section de cours d'eau. L'aménagement de tranchées filtrantes, de voies d'eau engazonnées, structures de captage, sorties de drains et empierrements a aussi été mis à profit dans la mise en valeur des ruisseaux des bassins *Intervention*.
- La phase d'évaluation (2004-2006) supportera la poursuite du suivi hydrométrique et de la qualité de l'eau des bassins *Intervention* et *Témoin* afin de quantifier l'effet des aménagements sur les exportations de sédiments et de nutriments à l'exutoire des bassins.

## 2.0 Déroulement des travaux

La réalisation du projet s'est déroulée conformément à l'échéancier original. Les différentes étapes de réalisation ont été supportées simultanément dans les trois régions agricoles ciblées par le réseau, incluant :

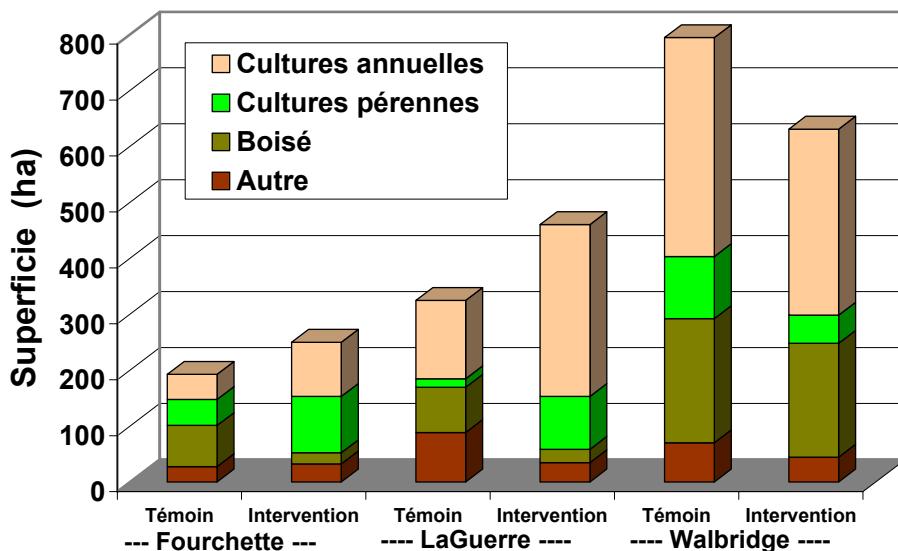
- la sélection des paires de bassins versants jumeaux dans les trois régions ciblées par le réseau;
- la collecte de données diagnostiques sur l'égouttement et l'érosion, de même que leur mise en forme en atlas agroenvironnementaux en format électronique pour les trois bassins versants *Intervention*;
- la production de bilans agronomiques détaillés à l'échelle du parcellaire pour les trois paires de bassins à l'étude;
- la mise en œuvre d'un suivi hydrométrique et de la qualité de l'eau sur les trois paires de bassins versants retenues;
- la planification et la mise en œuvre d'un plan intégré d'aménagement hydro-agricole des trois bassins *Intervention*.

## 2.1 Sélection des bassins versants expérimentaux

Les bassins versants de la rivière Fourchette, tributaire de l'Etchemin, de la Rivière aux Brochets, tributaire de la Baie Missisquoi, et de la rivière LaGuerre, tributaire du Lac Saint-François, sont les trois régions ciblées par le réseau. La sélection des bassins versants expérimentaux s'est fait en deux étapes. Les territoires ciblés ont d'abord fait l'objet d'une caractérisation biophysique préliminaire et de l'étude de l'utilisation du territoire, principalement avec le support du système d'information à référence spatiale GIRMA (Gestion intégrée des ressources en milieu agricole) développé au MAPAQ. La pré-sélection de bassins versants a d'abord ciblé l'identification de bassins présentant des similitudes au plan de :

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

Les visites sur le terrain ont permis par la suite d'évaluer la faisabilité du jaugeage hydrométrique des bassins pré-sélectionnés, de loin le facteur limitant au plan du choix des bassins. L'équipe du Centre d'Expertises hydrauliques du Québec (CEHQ) a validé la sélection des sections de contrôle hydrométrique. La figure 1 présente l'utilisation du sol des trois paires de bassins jumeaux sélectionnés. Leurs localisations respectives dans les régions de Chaudières-Appalaches et de la Montérégie, de même que leurs principales caractéristiques biophysiques et l'utilisation des sols sont illustrées en annexe I.

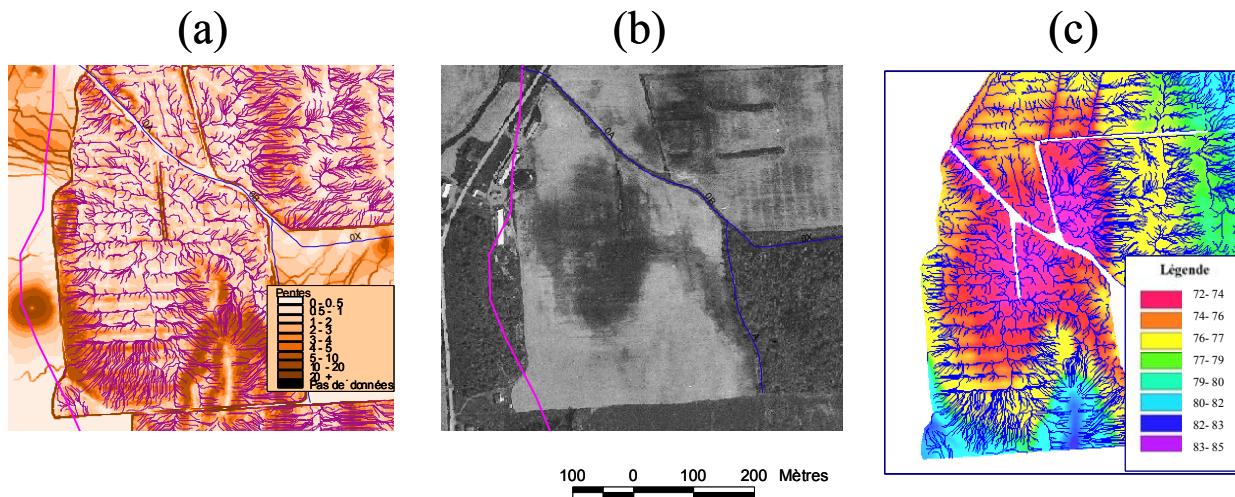


**Figure 1.** Superficie et utilisation du sol des bassins versants expérimentaux du réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles.

## 2.2 Diagnostics et atlas agroenvironnementaux

La planification et la mise en œuvre de pratiques et aménagements de conservation des sols et de l'eau en deuxième année du projet dans les bassins *Intervention* se sont appuyées sur la caractérisation biophysique des bassins et un diagnostic détaillé de l'égouttement du parcellaire. L'ensemble des bassins *Intervention* ont profité en 2001-2002 d'une représentation et une intégration spatiale de leurs propriétés topographiques, pédologiques et hydrologiques, de même que d'un découpage du parcellaire sur la base d'*ortho-photos* et la capture printanière d'images multi-spectrales aéroportées. Réalisée en mi-mai, 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 priorisation des interventions. Tôt au printemps 2002, les trois bassins *Intervention* ont aussi profité d'un diagnostic-terrain photographique et géopositionné de l'ensemble des rives de cours d'eau et des confluences de fossés. Les campagnes d'observations ont répertorié et localisé 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.

La caractérisation haute précision du relief, non prévue initialement au calendrier de réalisation du projet, a complété le diagnostic d'égouttement du parcellaire des bassins *Intervention* Walbridge et LaGuerre en Montérégie. Cette caractérisation a été coordonnée par M. Roger Rivest, conseiller en grandes cultures à la Direction régionale Montérégie-Est du MAPAQ. La cartographie du relief a 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, une information fort utile dans l'évaluation de la pertinence de recourir à des aménagements hydro-agricoles tels que des structures de captage ou de sédimentation.



**Figure 2.** Le parcours modélisé des eaux de ruissellement (a) extrait du modèle numérique de terrain (c) traduit les zones hydrologiquement actives du parcellaire révélées par les images aériennes (b) (Duguet, 2002)

L'ensemble des informations à référence spatiale pour les trois bassins *Intervention* a été intégrée avec le support des logiciels en géomatique *TNT-mips* et *Arcview*. La mise en forme des données dans un atlas électronique convivial a permis de distribuer sans frais les systèmes d'information géographique (SIG) à l'ensemble des conseillers et producteurs agricoles impliqués dans le projet. Des planches extraites des atlas sont reproduites en annexe 4.1 du présent rapport, alors que le manuel d'instruction est reproduit en annexe VII.

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.

### **2.3 Bilan agronomique**

La caractérisation des systèmes de production agricole est essentielle à l'interprétation des données du suivi de l'écosystème aquatique. Les suivis agronomiques des exploitations agricoles des bassins versants *Témoin* et *Intervention* ont été coordonnés par les conseillers agricoles des Clubs-conseil en agroenvironnement. Les entrevues individuelles auprès des gestionnaires d'entreprises agricoles, localisées en tout ou en partie dans les bassins à l'étude, a permis de colliger l'ensemble des données de gestion des sols et des cultures à l'échelle de la parcelle pour l'année référence 2002 et les six bassins à l'étude, incluant:

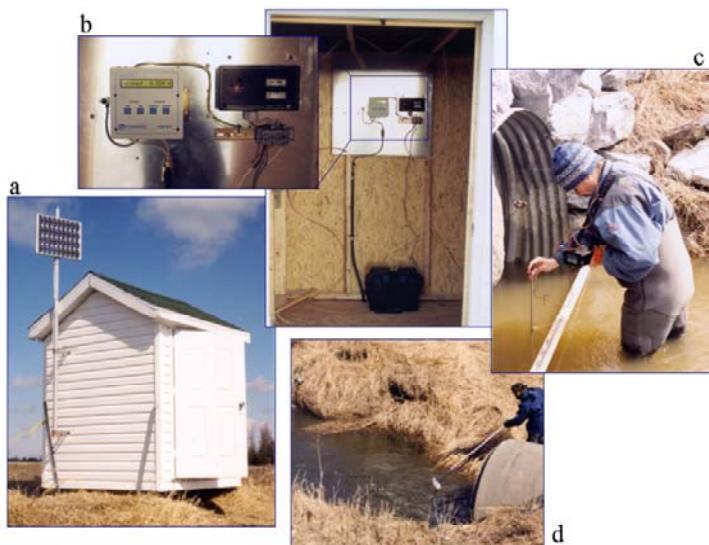
- l'identification du parcellaire et la représentation du plan de ferme;
- le plan de culture;
- les particularités du drainage de surface et souterrain;
- la pratiques culturale, incluant les dates et le type d'outil aratoire utilisé;
- les pratiques de gestion des épandages des engrains de ferme, incluant les propriétés de l'engrain 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 engrains minéraux.

Les bilans d'apport à la surface du sol et les bilans agronomiques en azote et en phosphore ont été estimés sur la base des données de gestion colligées à l'échelle de la parcelle. Une description de la banque de données agronomiques est présentée en annexe II. Les moyennes des bilans d'apports en azote et phosphore, pondérées pour la superficie en culture, de l'ensemble des bassins versants expérimentaux à l'étude sont rapportées au tableau 2 . Cette caractérisation de la gestion des sols et des cultures en première phase de projet (période de calibration des bassins) permettra éventuellement de valider l'hypothèse que la réduction des exportations à l'exutoire des bassins Intervention est attribuable aux investissements dans les pratiques et aménagements de conservation des sols et de l'eau. Un suivi agronomique selon les mêmes modalités devra ainsi accompagner la troisième phase du projet (période d'évaluation).

## 2.4 Jaugeage et relevés hydrométriques

L'installation des stations de jaugeage a été supportée conjointement par l'équipe de l'IRDA et du CEHQ. Six cabanons et lymnigraphes ont été installés aux confluences des bassins expérimentaux (figure 3). Les stations de jaugeage ont fait l'objet de lectures lymnimétriques à au moins huit reprises depuis leur installation, de façon à calibrer la relation hauteur-débit aux sections de contrôle. L'équipe du CEHQ a assuré le dépouillement et la modélisation de la courbe de tarage pour les bassins versants de Saint-Isidore et Saint-Ignace-de-Standbridge. L'équipe de l'IRDA a pour sa part coordonné le suivi hydrométrique des bassins de la région de Saint-Anicet. Les visites de terrain printanières et estivales ont démontré que la gestion artificielle du débit de la rivière LaGuerre, pompée à son embouchure dans le Lac Saint-François, ne permettait pas d'établir une courbe de tarage appropriée pour le bassin *Intervention*. Le refoulement dans les tributaires, occasionné par l'arrêt ou la minimisation des activités de pompage en période de pointe récréo-touristique au Lac Saint-François, de même que par les crues naturelles du bassin LaGuerre, limite en effet la possibilité d'établir une relation stable entre les niveaux et les débits à l'exutoire du bassin *Intervention*. Le bassin a par ailleurs été largement inondé à la mi-juin 2002 en raison des fortes précipitations et des bris occasionnés à la station municipale de pompage de la rivière LaGuerre. L'équipe de l'IRDA a ainsi multiplié les mesures de débits pendant les périodes d'importante activité hydrologique et en période de refoulement afin d'ajuster la courbe de tarage du bassin *Intervention* sur la base des observations au bassin *Témoin*. La position relativement plus élevée du bassin *Témoin* a en effet soustrait ce dernier à la grande majorité des épisodes récurrents de refoulement observés au bassin *Intervention*.

L'interprétation des bilans hydriques de l'ensemble du réseau a par ailleurs été supportée par l'acquisition des données météorologiques. Les précipitations, températures et couvertures de neige journalières pour la période d'étude aux bassins Fourchette, Walbridge et LaGuerre ont été obtenues de la banque de données du Ministère de l'Environnement du Québec pour les stations localisées respectivement à Scott, Farnham et Saint-Anicet.



**Figure 3.** Dispositif expérimental de jaugeage du réseau de bassins versants expérimentaux : abri et panneau d'alimentation solaire (a); enregistreur-lymnimètre et dispositif d'alimentation (b); jaugeage du débit (c) et échantillonnage ponctuel (d).

## **2.5 Suivi de la qualité de l'eau**

La période de caractérisation hydrométrique et géochimique des eaux des six bassins versants à l'étude s'étend de novembre 2001 à mai 2003. Compte tenu du dispositif expérimental en bassins jumeaux, cette *Période de Calibration* constitue la première phase de projet, qui servira éventuellement de référence pour détecter une réponse significative de la qualité de l'eau aux aménagements hydro-agricole dans le bassin Intervention, lors de la *Période d'évaluation*. Dans un protocole reposant sur un suivi hydrométrique en continue et un échantillonnage ponctuel de la qualité des eaux, l'établissement de relations entre les régimes d'exportation des sédiments et des éléments nutritifs des bassins *Témoin* et *Intervention* a été réalisé en deux étapes :

- Dans un premier temps, les charges respectives de chaque paramètre de qualité de l'eau ont été modélisées individuellement pour chacun des bassins *Témoin* et *Intervention* sur la base des relations concentration-débit (C/Q) propres à chacun des ruisseaux;
- Les charges hebdomadaires estimées pour les deux ruisseaux pairés ont par la suite été mises en relation au moyen de régressions linéaires. Les estimateurs de ces régressions serviront de balise pour évaluer l'évolution relative des flux à l'exutoire du bassin *Intervention* en réponse aux aménagements lors de la *Période d'évaluation*.

Une moyenne de 166 échantillons d'eau ont été prélevés à l'exutoire des bassins versants expérimentaux et dosés en laboratoire pour la durée du projet. La densité d'échantillonnage a été rehaussée par rapport à ce qui était initialement prévu au protocole expérimental initial (30 à 50 échantillons par année pour chaque bassin) afin d'assurer une modélisation des charges acceptable au plan statistique, soit présentant un coefficient de variation (Cv) en-deça du seuil de 20% jugé acceptable pour la modélisation de petits tributaires (Walker, 1988). La variabilité temporelle élevée des paramètres de qualité de l'eau est attribuée à la faible superficie des bassins expérimentaux, qui conditionne des réponses courtes et intenses aux événements de précipitations. Les teneurs des eaux de surface en matières en suspension et en différentes fractions de phosphore sont particulièrement influencées par le fonctionnement hydrologique du bassin. Aussi, 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 événement de ruissellement, généralement prélevés de part et d'autre de la pointe de crue. Afin de supporter l'interprétation de données de qualité de l'eau, les échantillonnages ont été complémentés par des observations *terrain* pertinentes aux conditions hydrologiques, notamment la présence de flaques et de ruissellement dans les champs et l'activité des drains souterrains.

### **Analyses des eaux**

Les échantillons d'eau ont été conservés à une température inférieure à 4 degrés celcius jusqu'à ce qu'ils soient analysés en laboratoire. Les échantillons ont tous été dosés au laboratoire de physico-chimie de l'IRDA. Les matières en suspensions ont été quantifiées par filtration (<0.45 um). Les concentrations en orthophosphates (P ortho), P total en solution (P soln), P biodisponible (P bio) et P total (P total) ont été déterminées par colorimétrie automatique avec la formation d'un complexe jaune de phosphomolybdate réduit par l'acide ascorbique (Murphy et Riley, 1962), après que l'échantillon ait respectivement subit une filtration (<0.45 um), une extraction à 0.1 N NaOH (Sharpley et al., 1991) et une minéralisation au persulfate. L'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) ont été déterminés selon des méthodes adaptées de *Standard Methods For Examination of Waste and Waste Water* (1992a et 1992b).

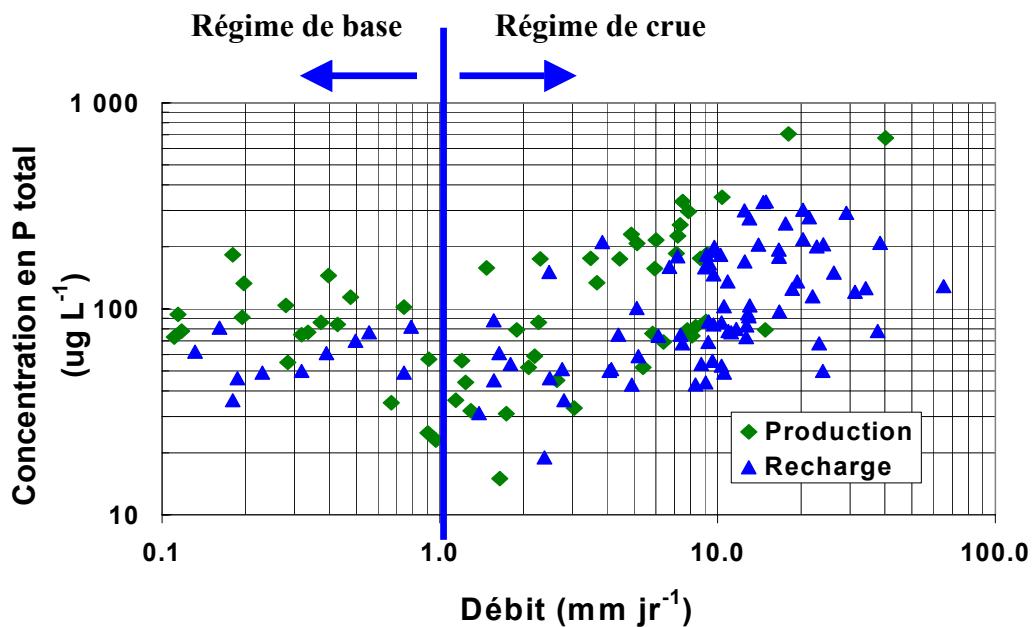
### **Modélisations des flux journaliers**

Les modélisations des flux journaliers de sédiments (MES), de phosphore (P), d'azote (N) et d'éléments majeurs ont été supportés 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 (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. Conceptuellement, les deux ou trois strates de débits retenues dans la modélisation des charges reflètent la gamme des conditions d'écoulement à l'œuvre dans le bassin versant pour la période d'étude. 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 des différentes fractions de P sont particulièrement élevés en régime de crue en raison de leur transport préférentiel dans le ruissellement de surface. 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 de recharge (décembre à avril) et de production (mai à novembre) traduit pour sa part l'influence des conditions climatiques et du calendrier des opérations culturelles sur la qualité du ruissellement. En période de recharge, 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 période de production, les travaux aratoires ou l'apport récent d'engrais de ferme et d'engrais minéraux contribuent à un potentiel plus élevé d'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 la paire de bassins jumeaux afin de permettre une comparaison de leurs régimes d'exportation.



**Figure 4.** Relation entre la concentration en phosphore total et le débit du ruisseau à l'exutoire du bassin versant Intervention du réseau de la rivière Fourchette.

Les observations hydrométriques et de qualité de l'eau du bassin Intervention du réseau Fourchette illustrent bien les influences saisonnières et de l'activité hydrologique sur le régime d'exportation diffuse du P en petit bassin versant agricole. La figure 4 illustre la stratification des observations de concentrations en phosphore total (P-total) à l'exutoire du bassin Intervention Fourchette selon deux strates de débits et deux périodes saisonnières. En période de recharge (décembre à avril), les concentrations en P-total augmentent avec le débit du ruisseau, en régime d'écoulement de base (faible

débit), comme en régime de crue. Les concentrations en P-total sont pratiquement doublées en régime de crue (moyenne pondérée pour le débit de 228 ug L<sup>-1</sup>) comparativement à la strate de faibles débits (132 ug L<sup>-1</sup>). Une concentration plus élevée en P-total du ruisseau en régime de crue traduit une contribution plus importante du ruissellement de surface au débit du ruisseau. Lors des crues en période de production (mai à novembre), la concentration (moyenne pondérée de 319 ug L<sup>-1</sup>) et la pente de la régression C/Q demeurent supérieures à la période hivernale (annexe 3.4.2), en raison des pratiques culturales et des apports récents de P qui favorisent le prélèvement et le transport de P dans le ruissellement. Cependant, en régime d'écoulement de base au cours de la même période (mai à novembre), la régression C/Q n'apparaît plus significative, traduisant un effet de rétention du P dans le réseau hydrographique.

**Tableau 2.** Utilisation du sol, bilan agronomique, bilan hydrique et flux de matières en suspension, d'azote, et de phosphore modélisés aux exutoires des six bassins versants expérimentaux à l'étude pour la période de calibration des bassins (novembre 2002 à mai 2003).

	Rivière Fourchette		Rivière LaGuerre		Ruisseau Walbridge	
	Témoin	Intervention	Témoin	Intervention	Témoin	Intervention
<b>Utilisation du sol</b>						
Superficie totale du bassin (ha)	192	250	324	460	794	631
Cultures annuelles (%)	23%	39%	43%	67%	49%	53%
Cultures pérennes (%)	24%	40%	5%	21%	14%	8%
Boisé (%)	38%	8%	25%	5%	28%	32%
Autre (%)	14%	13%	27%	8%	9%	7%
<b>Bilan agronomique</b>						
Bilan agronomique annuel de l'azote (kg N/ha en culture) <sup>1</sup>	-23	-30	-21	-25	-14	-16
Bilan annuel d'apport de phosphore à la surface du sol (kg P/ha en culture) <sup>2</sup>	31	15	12	15	15	29
<b>Bilan hydrique<sup>3</sup></b>						
Précipitation pluie et neige (mm)	1581	1581	1353	1353	1520	1520
Ruisseaulement (mm)	992	1018	949	932	841	771
<b>Flux exporté / superficie du bassin</b>						
Matière en suspension (kg/ha)	1 319	484	185	147	530	224
Phosphore total (kg/ha)	3.64	2.31	0.66	1.39	1.33	1.06
Phosphore biodisponible (kg/ha)	1.88	1.49	0.29	0.92	0.67	0.59
Ortho-phosphates (kg/ha)	0.90	1.12	0.14	0.80	0.30	0.39
Phosphore total en solution (kg/ha)	1.05	1.24	0.18	0.88	0.33	0.44
Azote ammoniacal (kg/ha)	8.30	3.87	0.51	1.31	0.91	0.91
Nitrates (kg/ha)	31	53	27	58	50	61

(1) Apports (Engrais de ferme (efficace) + Engrais minéraux) - Recommandation agronomique (saison 2002).

(2) Apports (Engrais de ferme + Engrais minéraux) - Prélèvement des cultures (saison 2002).

(3) Cumulatif pour la période de nov. 2001 à mai 2003; Fourchette et Walbridge: 567 jours; LaGuerre: 520 jours.

Le tableau 2 rapporte les flux totaux en MES, N et P tels qu'estimés pour la période de calibration pour les six bassins versants expérimentaux du réseau d'étude. Les données brutes de qualité d'eau et de débits utilisés comme intrants dans la modélisation des flux, de même que les modèles de régression développés sont détaillés en annexe III. Dans l'ensemble, les flux estimés mettent en relief certains contrastes dans les régimes d'exportation entre les bassins versants pairés. Au plan méthodologique, il convient de mettre en relief les différences observées entre les bassins jumeaux en période de calibration, précédent l'aménagement du bassin, de façon à bien supporter l'interprétation de l'évolution de la qualité de l'eau au cours de la période d'évaluation du projet.

Réseau Walbridge. Les concentrations et les charges de matières en suspension (MES) pondérées pour la superficie du bassin *Témoin* ( $530 \text{ kg ha}^{-1}$ ) demeurent largement supérieures à celles observées au bassin *Intervention* ( $224 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Ces différences s'observent en période d'écoulement de base comme en période de crue. L'occupation du sol et les systèmes cultureaux en place dans les deux bassins n'apportent pas d'explication plausible aux différences dans les flux de sédiments exportés. Les flux contrastants de MES s'expliquerait plutôt par la nature des sols et la position relative des sous-bassins expérimentaux *Témoin* et *Intervention* dans le paysage du bassin Walbridge ( $30 \text{ km}^2$ ). La position relativement plus basse du bassin *Témoin*, dont l'exutoire est localisé 13 m plus bas que le bassin *Intervention*, favorise la présence de la nappe à proximité de la surface du sol. Cette proximité fait en sorte que le bassin *Témoin* est plus susceptible de produire du ruissellement de surface que le bassin *Intervention*, localisé en position plus haute dans le relief. En effet, compte tenu de l'intensité modérée des précipitations au Québec, la répartition surface/souterraine du ruissellement est généralement contrôlée par le développement de l'état de saturation du sol. C'est donc le caractère cumulatif des précipitations et les particularités du paysage qui conditionnent les cheminements hydrologiques, notamment une position basse dans le relief, la proximité de la nappe phréatique, un sous-sol peu perméable, la proximité ou la convergence des cours d'eau. En période de crue, la position relativement plus basse dans le relief du bassin *Témoin* favorise ainsi une réponse accrue du ruissellement de surface aux précipitations, qui se traduit par une concentration plus élevée en MES. Une différence dans les volumes annuels de ruissellement de l'ordre de 70 mm favorisant le bassin *Témoin* supporte cette hypothèse. Des études antérieures réalisées dans la région ont par démontré l'influence du paysage sur la prédisposition des sous-bassins hydrographiques à produire du ruissellement de surface (Michaud et al., 2002; Deslandes et al., 2002).

Bien que le bassin *Intervention* témoigne de charges moindres en MES et en P pour la période à l'étude, les pente de régression concentration/débit (C/Q) des paramètres de MES et de toutes les fractions de P y demeurent cependant plus élevées en régime hydrique de crue que dans le bassin *Témoin* (annexes 3.4.1). Ce taux relativement plus élevé de l'augmentation de la concentration en MES ou en P, en réponse à l'activité hydrologique dans le bassin, est observé en période de recharge comme en période de production. Le relief plus érosif du bassin *Intervention* expliquerait cette particularité dans le fonctionnement hydrologique du bassin, en favorisant des concentrations élevées de MES et de P lors des événements hydrologiques comportant une forte composante de ruissellement de surface. Bien que le bassin *Intervention* ait une réponse plus intense de sa concentration en MES ou en P aux fortes crues, rappelons que sa position relativement plus haute dans le paysage fait en sorte qu'une proportion moins importante de son bilan hydrique se traduit en ruissellement de surface. Le développement plus tardif de la saturation du sol et/ou sur une superficie en culture relativement moins importante dans le bassin *Témoin* résulte ainsi en un bilan net d'exportation de MES et de P inférieur dans le bassin *Intervention*. Une implication pratique de ces observations pour l'interprétation de l'influence du paysage sur la mobilité des sédiments et du P dans la région est que les conditions qui prévalent au développement de l'état de saturation du sol ont une influence plus marquée sur le bilan des exportations que l'érosivité du relief.

En régime d'écoulement de base, une concentration en MES beaucoup plus élevée dans le bassin *Témoin* est attribué à la remise en suspension de sédiments stockés dans le réseau hydrographique. La position relativement basse du bassin et la morphologie du tronçon principal du cours d'eau bassin *Témoin* favorise l'accumulation de sédiments dans le lit du ruisseau. L'exportation des sédiments dans le bassin *Intervention* est pour sa part encouragée par le relief fortement incliné du lit du tronçon principal du cours d'eau (0.53% de pente moyenne).

Enfin, l'analyse de la spéciation du P exporté dans le ruissellement des deux bassins jumeaux démontre une biodisponibilité relativement plus élevée des formes de P dans le bassin *Intervention*. Un bilan d'apport en P près de deux fois plus élevé dans le bassin *Intervention* ( $29 \text{ kg P an}^{-1}$ ) a pu contribuer à une spéciation qui avantage les formes solubles et réactives de P. Un cheminement souterrain du ruissellement est aussi de nature à favoriser une plus forte biodisponibilité de la charge de P, tel qu'observé dans des études antérieures réalisées dans la région (Michaud et al., 2002). Les stocks de sédiment présents dans le bassin *Témoin* ont par ailleurs pu contribuer à la fixation du P réactif présent dans la colonne d'eau et ainsi réduire l'importance des formes solubles de P et la biodisponibilité du P particulaire exporté. Cette relative opposition dans les gradients de charge et de spéciation du P dans les bassins *Témoin* et *Intervention* milite pour la prise en compte de ces deux caractéristiques du bilan environnemental dans la détection de tendances dans la qualité de l'eau en troisième phase de projet.

Réseau Fourchette. Les bassins versants jumeaux du réseau Fourchette se distinguent par leurs régimes d'exportation de MES, des formes particulières de P et de l'ammoniac. La vulnérabilité élevée du parcellaire à l'érosion des sols, de même que l'influence présumée de sources ponctuelles de contamination dans le bassin *Témoin* contribueraient à expliquer les dynamiques contrastantes des différents paramètres de qualité de l'eau à l'étude.

La charge de sédiments à l'exutoire du bassin *Témoin*, pondérée pour la superficie du bassin, a été estimée à plus de 1300 kg/ha pour la période à l'étude (tableau 2), soit près de trois fois le taux d'exportation moyen de sédiments du bassin Intervention (484 kg/ha). De telles pertes de sol, malgré une superficie en culture relativement moins importante (47%) dans le bassin *Témoin* que dans le bassin *Intervention* (79%), est attribuable à son relief vallonné qui accentue l'arrachement et la prise en charge de sédiments dans le ruissellement de surface au champ, de même qu'à la sévère érosion des berges active dans la portion aval du tronçon de cours d'eau principal. L'arrivée de la culture annuelle dans ces champs, en fin de rotation longue, a coïncidé avec l'initialisation du suivi de la qualité de l'eau et constitue un facteur déterminant à considérer dans l'analyse éventuelle des tendances dans les paramètres de qualité de l'eau à l'étude.

Les charges de P estimées aux exutoires des deux bassins reflètent leurs taux respectifs d'exportation de sédiments, confirmant l'importance des processus d'érosion dans l'apport de P particulier au cours d'eau. Les concentrations contrastées en MES explique aussi une plus forte proportion de la fraction soluble de P dans le bassin *Intervention* (54%) que dans le bassin *Témoin* (29%). Une dynamique d'adsorption présumée plus active dans les eaux de surface du ruisseau *Témoin* favoriserait ainsi la nature particulière du P observée à son exutoire.

Si les charges de P et leur spéciation diffèrent largement dans les bassins *Témoin* et *Intervention*, il en va de même pour les relations C/Q des différentes formes de P. Les relations concentrations-débits au bassin *Intervention* (annexes 3.4.2) pour les différentes périodes de l'année et de régimes d'écoulement traduisent typiquement une dynamique d'exportation diffuse. Lors des épisodes de crue ( $Q>1.38 \text{ mm/jr}$ ), les concentrations en P des eaux du bassin *Intervention* demeurent significativement proportionnelles au débit du ruisseau. La pente C/Q en période de recharge (0.34) est légèrement inférieure au taux estimé en période de production (0.47) reflétant l'influence saisonnière sur le régime d'exportation du P. Les valeurs moyennes pondérées de concentration pour la strate de débit élevée du ruisseau ( $228\text{-}319 \text{ ug L}^{-1} \text{ P total}$ ) demeurent par ailleurs supérieures aux observations en écoulement de base ( $132\text{-}134 \text{ ug L}^{-1} \text{ P total}$ ). Le bassin *Témoin* présente pour sa part des concentrations élevées de P en régime d'écoulement de base ( $298\text{-}412 \text{ ug L}^{-1} \text{ P total}$ ), de même qu'en azote ammoniacal et en potassium (moyennes pondérées pour le débit de l'ordre de  $1.5\text{-}1.7 \text{ mg L}^{-1} \text{ N}$  et de  $13\text{-}19 \text{ mg L}^{-1} \text{ K}$  respectivement). La relation entre la concentrations en P de l'eau et le débit apparaît par ailleurs aléatoire dans la strate de débit élevé du ruisseau pour la période de mai à novembre. Ces concentrations élevées en conditions d'écoulement de base et une pente C/Q négative traduisent généralement l'influence de sources ponctuelles de contamination, alors que l'augmentation du débit a un effet de dilution de l'apport diffus, plutôt qu'une contribution à la charge de contamination.

Parallèlement à une influence présumée de sources ponctuelles contamination dans le bassin *Témoin*, les concentrations élevées de MES en régime d'écoulement de base indiquent que la remise en suspension de sédiments, en réponse à de faibles fluctuations du débit, contribue vraisemblablement au relargage de P et de N ammoniacal stocké dans le réseau hydrographique. Le dispositif expérimental ne permet cependant pas de quantifier les influences respectives des contributions ponctuelles et du relargage sur le bilan global des exportations de N et de P à l'exutoire du bassin expérimental. A défaut de préciser l'origine des sources de contamination dans le bassin *Témoin*, la détection de changements dans le régime d'exportation du bassin *Intervention* en troisième phase du projet phase devra s'appuyer sur la strate de débits élevés des ruisseaux en période automnale et printanière. Les relations C/Q sont alors significatives pour les paramètres MES et le P, et l'influence des sources ponctuelles et du relargage sont présumées marginales. La majeure partie des charges de MES, N ammoniacal et P exportées annuellement sont par ailleurs associée à cette période.

Réseau LaGuerre. Les bassins versants jumeaux du réseau LaGuerre présentent des régimes d'exportation de sédiments et d'éléments nutritifs contrastés, particulièrement en période de recharge, 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. Malgré une portion relativement moindre de son territoire en culture (48%) et une très large prépondérance des cultures annuelles, les concentrations et la charge en MES au bassin *Témoin* ( $185 \text{ kg ha}^{-1}$  MES) demeurent légèrement supérieures au bassin *Intervention* ( $147 \text{ kg ha}^{-1}$  MES) (tableau 2). Alors que le bassin *Témoin* présente des pentes C/Q positives et significatives pour la période de recharge en régime de crue ( $Q > 5.5 \text{ mm jr}^{-1}$ ) pour les paramètres MES et toutes les formes de P, les pentes de régression C/Q apparaissent aléatoires au bassin *Intervention* pour les mêmes paramètres et la même période (annexes 3.4.3). En fait, de tous les bassins du réseau à l'étude, le bassin *Intervention* de la rivière LaGuerre est le seul qui ne présente pas de relation significative entre son débit et les concentrations en MES et en P en régime de crue lors de la période de recharge. Une exportation relativement faible et un comportement aléatoire de la concentration en sédiments en période de recharge au bassin *Intervention* tient au refoulement de son écoulement naturel, occasionné par le contrôle artificiel du débit de la rivière LaGuerre à son embouchure. Les observations hydrométriques colligées au cours de l'étude démontrent en effet que le bassin *Intervention* est plus sujet aux épisodes de refoulement (relation hauteur-débit aléatoire) que le bassin *Témoin*. La position relativement plus élevée de ce dernier dans le relief du bassin LaGuerre (4m de différence d'élévation aux exutoires) le soustrait la plupart du temps à l'influence du refoulement.

L'abondante accumulation de sédiments dans les branches du ruisseau *Intervention*, malgré un récorage au milieu des années quatre vingt dix, témoigne aussi de la dynamique de refoulement et de sédimentation à l'œuvre dans le bassin *Intervention*. 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. Les phénomènes de rétention se répercutent sur la qualité de l'eau en régime d'écoulement de base et modéré ( $Q < 5.5 \text{ mm jr}^{-1}$ ). Le relargage du phosphore et de l'azote ammoniacal stocké dans le lit du ruisseau du bassin *Intervention* contribue vraisemblablement au maintien de concentrations nettement plus élevées en ces éléments que dans le bassin *Témoin*.

Les phénomènes de refoulement et de sédimentation à l'œuvre dans le bassin *Intervention* contribuerait aussi à expliquer une spéciation qui favorise la forme soluble de P dans le bassin *Intervention* (63% du P total sous forme soluble) comparativement à une charge de P à dominance particulière dans le bassin *Témoin* (27% du P total sous forme soluble). Cette différence dans les spéciations du P a pour effet de ramener la biodisponibilité globale des charges P des bassins *Témoin* et *Intervention* à respectivement 43% et 66%.

Globalement, les charges et concentrations de P total, de P biodisponible, de nitrates et de N ammoniacal en régime de crue reflètent l'importance relative des superficies en culture dans les bassins à l'étude. Lors des épisodes de crue, le ruissellement provenant des superficies boisées dans le bassin *Témoin* (25%, vs 5% dans le bassin *Intervention*) contribuent à diluer les concentrations de MES, N, et P du ruissellement provenant des champs en culture. Il est par ailleurs présumé que le refoulement épisodique du cours d'eau et la position relativement basse du bassin *Intervention* dans le paysage y favorise la rétention de la nappe et affecte la répartition surface/souterraine du ruissellement. Un cheminement privilégié du ruissellement en surface du parcellaire dans le bassin *Intervention* y contribuerait à accroître les concentrations de N ammoniacal et de P dans l'eau de surface.

### **Comparaison des régimes d'exportation des bassins *Témoin* et *Intervention***

Les charges hebdomadaires des paramètres de qualité de l'eau à l'étude pour chaque paire de bassins jumeaux ont été estimées sur la base des sommes des flux journaliers. Les séries chronologiques de charges hebdomadaires des trois paires de bassins expérimentaux sont illustrées en annexe 3.1.3. Conformément au protocole de recherche, la comparaison des régimes d'exportation pour chaque paire de bassins jumeaux a été supportée par une analyse de régression linéaire mettant en relation leurs charges hebdomadaires respectives. Les analyses de régression ont été appliquées aux transformations logarithmiques des charges hebdomadaires de sédiments, N et P, afin d'assurer la normalité des distributions et l'homogénéité des variances. Comme l'autocorrélation des erreurs peut affecter sérieusement les résultats de l'analyse de régression, celle-ci a été diagnostiquée au moyen d'une analyse des résidus en fonction du temps et du test de Durbin-Watson.

Un modèle de régression simple avec erreurs aléatoires, suivant un processus auto-régressif de premier ordre, noté AR(1), a donc été retenu pour l'analyse des données :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_t = \rho \varepsilon_{t-1} + u_t$$

où :  $Y$  est la charge hebdomadaire du bassin Intervention;

$X$  est la charge hebdomadaire du bassin Témoin;

$\beta_0$  est le paramètre correspondant à l'ordonnée à l'origine du modèle;

$\beta_1$  est le paramètre correspondant à la pente du modèle;

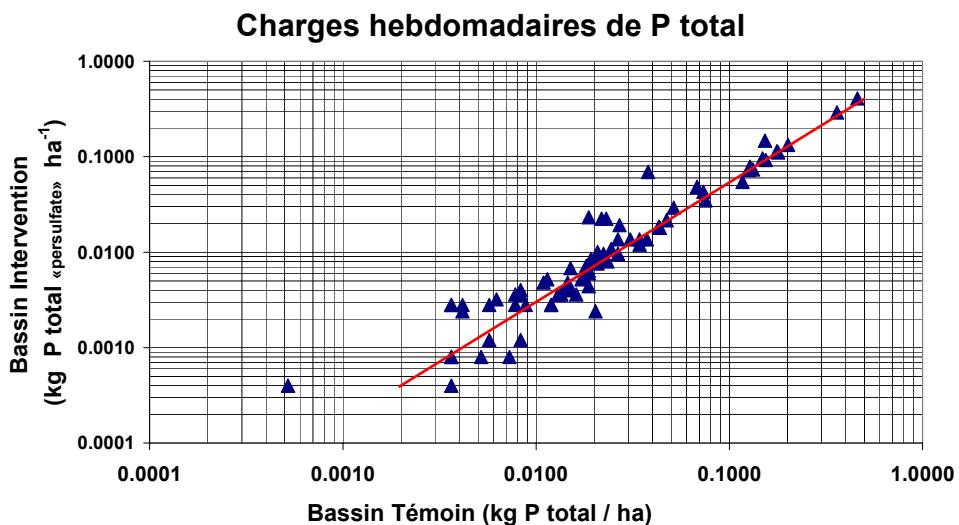
$\varepsilon_t$  sont des erreurs autocorrélées;

$\rho$  est le paramètre d'autocorrélation tel que  $|\rho| < 1$

les erreurs  $u_t$  sont indépendantes et identiquement distribuées  $N(0, \sigma^2)$ .

Dans le cas où le test de Durbin-Watson nous amène à la conclusion qu'il n'y a pas d'autocorrélation, alors le paramètre  $\rho = 0$  et les erreurs  $\varepsilon_t$  sont indépendantes. Le modèle devient alors un modèle de régression ordinaire.

La procédure AUROREG de la version 8.2 de SAS (2000) a été utilisée afin de tenir compte de l'autocorrélation des erreurs. Cette procédure ajuste d'abord un modèle de régression ordinaire par la méthode des moindres carrés. Les graphiques des résidus en fonction des valeurs prédites et en fonction du temps sont tracés afin de vérifier l'hypothèse de variance constante et d'indépendances des résidus en fonction du temps. La statistique de Durbin-Watson est alors calculée. Une statistique inférieure à 2, accompagnée d'une probabilité inférieure à 5%, permet de conclure à une auto-corrélation d'ordre 1. Dans cette éventualité, le modèle AR(1) est ajusté par la méthode du maximum de vraisemblance et la statistique de Durbin-Watson est recalculée. Le modèle final est retenu dans la mesure où l'autocorrélation a disparu.



$$\text{Log (Ptotal-Intervention)} = -0.59 + 1.16 (\text{Log (Ptotal-Témoin)}) \quad R^2=0.90$$

**Figure 4.** Modèle de régression linéaire ajusté aux estimations de charges hebdomadaires de phosphore total à l'exutoire du bassin *Intervention* en relation avec les charges estimées au bassin *Témoin* du réseau Fourchette.

La figure 4 illustre les résultats de la régression linéaire appliquée aux charges hebdomadaires de P total des bassins jumeaux de la rivière Fourchette. Dans ce cas, l'auto-corrélation des charges hebdomadaires ne s'est pas avérée significative. Un modèle de régression ordinaire exprime donc la relation entre les exportations hebdomadaires du bassin Intervention sur la base des charges estimées au bassin Témoin. Cette relation établie pour la période de calibration du projet servira éventuellement de balise pour détecter une tendance significative dans l'amélioration de la qualité de l'eau au fil des interventions agroenvironnementales dans le bassin *Intervention*. Des modèles incluant un paramètre d'auto-régression ont cependant été nécessaires dans l'analyse de la plupart des paramètres de qualité d'eau des trois paires de bassins versants. Le tableau 3 décrits les modèles de régression retenus pour l'ensemble du réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles.

## 2.6 Aménagements des bassins versants *Intervention*

L'objectif principal du volet scientifique du projet est d'analyser l'effet d'actions agroenvironnementales concertées à l'échelle du bassin versant sur l'évolution de la qualité des eaux de surface. Des études récentes de caractérisation des écosystèmes aquatiques en bassins agricoles réalisées dans la région de Missisquoi ont démontré l'importance du contrôle hydrologique sur la mobilité des sédiments et des nutriments (Michaud et al., 2002; Duguet et al., 2002). Aussi, l'aménagement riverain et le contrôle du ruissellement de surface ont été priorisés dans la phase *Aménagement* du projet en 2004.

En matière de prévention de la contamination diffuse des eaux de surface, l'aménagement hydro-agricole du parcellaire et du réseau hydrographique constitue la troisième ligne de défense agroenvironnementale. La gestion raisonnée des intrants et l'adoption de pratiques culturales durables demeurent les prémisses à des systèmes de production agricole qui respectent le potentiel auto-épurateur des cours d'eau en milieu agricole. Les aménagements hydro-agricoles mis en œuvre dans le cadre du présent projet s'inscrivent ainsi en complémentarité des démarches entreprises à l'égard de la gestion des sols et des cultures par les propriétaires participants du réseau. Ces derniers sont pour la plupart membres d'un Club-conseil en agroenvironnement et ont déjà investi dans la fertilisation intégrée des cultures. Des pratiques culturales de conservation des sols, notamment le semis direct, sont en phase d'introduction ou bien intégrées dans les systèmes de production d'entreprises établies dans les trois bassins *Intervention* du réseau.

Dans un optique de gestion intégrée de l'eau à l'échelle du bassin versant, l'égouttement optimal du parcellaire concilie les objectifs de productivité des cultures et de prévention de la contamination des eaux de surface. L'égouttement déficient et la dégradation de la condition physique du profil cultural des sols constitue en effet le principal facteur limitant dans le rendement des cultures au Québec. Les zones de champ mal égouttées produisent un abondant ruissellement de surface qui entraîne sédiments et sels nutritifs dans le réseau hydrographique. Le colmatage du réseau par les sédiments perpétue le cercle vicieux d'un égouttement déficient, de baisses de rendement et de contamination diffuse des eaux de surface.

Une intervention durable sur le réseau hydrographique requiert l'implication de l'ensemble des riverains. La dégradation d'un tronçon du réseau a généralement des implications sur l'égouttement en amont, ou sur la sédimentation en aval. Dans le cadre du présent projet, la stratégie raisonnée de gestion du ruissellement de surface mise de l'avant s'appuie 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 le drainage souterrain;
- 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 tampon riveraines, qui joue un rôle de trappe à sédiments et intercepte les sources solubles de contamination;
- un aménagement du cours d'eau qui prévient l'érosion des talus et assure une évacuation efficace des eaux de drainage souterrain.

**Tableau 3.** Description des modèles de régression simple avec erreurs aléatoires, suivant un processus auto-régressif de premier ordre, développés pour la mise en relation des régimes d'exportation de sédiments, du phosphore et de l'azote pour les paires de bassins versants jumeaux de la rivière LaGuerre, du ruisseau Walbridge et de la rivière Fourchette.

### Bassins jumeaux de la rivière LaGuerre

Paramètre <sup>1</sup>	Ordonnée à l'origine ( $B_0$ )		Pente de la régression ( $B_1$ )		Paramètre auto-régressif AR(1)		Test de Durbin-Watson <sup>2</sup>		Ajustement du modèle		N <sup>4</sup>	
	log(flux) (g ha <sup>-1</sup> )	B <sub>0</sub>	Erreur-Type	B <sub>1</sub>	Erreur-Type	AR(1)	Erreur-Type	DW	P(DW)	EQM <sup>3</sup>	R <sup>2</sup>	
P Total	0.70	0.04		0.68	0.04	-0.34	0.13	2.10	0.60	0.02	0.90	52
P Bio	0.86	0.04		0.58	0.06	-0.27	0.14	2.1	0.62	0.03	0.79	47
P Ortho	1.04	0.08		0.44	0.09	-0.61	0.14	2.00	0.52	0.04	0.67	41
MES	0.31	0.11		0.89	0.03			1.70	0.11	0.01	0.95	41
NH <sub>4</sub>	0.91	0.11		0.48	0.07	-0.67	0.12	1.70	0.14	0.04	0.73	41
NO <sub>3</sub>	0.62	0.11		0.89	0.04			1.70	0.12	0.01	0.93	41

### Bassins jumeaux du ruisseau Walbridge

Paramètre <sup>1</sup>	Ordonnée à l'origine ( $B_0$ )		Pente de la régression ( $B_1$ )		Paramètre auto-régressif AR(1)		Test de Durbin-Watson <sup>2</sup>		Ajustement du modèle		N <sup>4</sup>	
	log(flux) (g ha <sup>-1</sup> )	B <sub>0</sub>	Erreur-Type	B <sub>1</sub>	Erreur-Type	AR(1)	Erreur-Type	DW	P(DW)	EQM <sup>3</sup>	R <sup>2</sup>	
P Total	-0.40	0.07		1.17	0.04	-0.58	0.10	2.10	0.70	0.04	0.90	69
P Bio	-0.21	0.06		1.09	0.05	-0.54	0.11	2.09	0.67	0.04	0.88	64
P Ortho	0.09	0.04		1.03	0.05	-0.27	0.13	1.89	0.34	0.05	0.86	60
MES	-2.79	0.30		1.56	0.08	-0.27	0.13	1.89	0.33	0.07	0.87	60
NH <sub>4</sub>	0.25	0.07		0.75	0.05	-0.48	0.11	2.06	0.61	0.06	0.77	70
NO <sub>3</sub>	0.38	0.11		0.90	0.04	-0.61	0.09	2.14	0.73	0.03	0.90	70

### Bassins jumeaux de la rivière Fourchette

Paramètre <sup>1</sup>	Ordonnée à l'origine ( $B_0$ )		Pente de la régression ( $B_1$ )		Paramètre auto-régressif AR(1)		Test de Durbin-Watson <sup>2</sup>		Ajustement du modèle		N <sup>4</sup>	
	log(flux) (g ha <sup>-1</sup> )	B <sub>0</sub>	Erreur-Type	B <sub>1</sub>	Erreur-Type	AR(1)	Erreur-Type	DW	P(DW)	EQM <sup>3</sup>	R <sup>2</sup>	
P Total	-0.59	0.07		1.16	0.05			1.60	0.05	0.05	0.90	76
P Bio	-0.59	0.06		1.25	0.05			1.75	0.13	0.03	0.90	68
P Ortho	-0.23	0.08		1.13	0.08			1.74	0.12	0.07	0.78	64
MES	-1.22	0.25		1.17	0.06	-0.38	0.13	1.95	0.40	0.04	0.89	63
NH <sub>4</sub>	-1.69	0.30		1.55	0.14	-0.74	0.09	2.05	0.57	0.07	0.84	63
NO <sub>3</sub>	-0.57	0.16		1.29	0.06			1.67	0.08	0.04	0.87	64

(1) Les charges hebdomadaires inférieures à 0.1 g/ha ont été exclues de l'analyse de régression.

(2) DW: Statistique de Durbin-Watson.

(3) EQM: Somme des carrés moyens due à l'erreur.

(4) Nombre d'observations.

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 distribué à l'ensemble des propriétaires et conseillers agricoles impliqués dans le projet, les atlas se sont avérés un outil rassembleur et fort 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 avec les 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 instable (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 la stabilisation des rives de cours d'eau, l'aménagement des confluences de fossés et des zones de concentration du ruissellement de surface. Les aménagements réalisés dans les trois bassins *Intervention* du réseau au cours de l'année, de même que les interventions priorisées pour le printemps 2004 sont décrits en annexes 4.2. Les commentaires suivants décrivent sommairement les problématiques ciblées et les interventions prioritaires dans les bassins Fourchette, Walbridge et LaGuerre. Une série de photographies illustrant les trois chantiers agroenvironnementaux est par ailleurs présentée en annexe V.

#### **Rivière Fourchette**

Dans le bassin d'intervention de la rivière Fourchette le réseau hydrographique présentait des talus en mauvaise état sur plus de 2,5 km de longueur de cours d'eau verbalisés, ainsi que du ravinement à l'embouchure des rigoles et des 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. Les travaux d'aménagements réalisés pour assurer la protection des diverses branches de cours d'eau du bassin incluent l'adoucissement des talus (pente 1,5:1), l'ensemencement d'herbacées en rive, la stabilisation des talus les plus instables par des techniques de bio-génie et l'établissement d'une bande riveraine (1 rangée d'arbustes ou d'arbres) sur l'ensemble des rives des cours d'eau verbalisés. Les espèces arborescentes ont été privilégiées pour établir une haie brise-vent. L'érosion par ravinement en de nombreux points du réseau hydrographique résultait 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 à l'embouchure des rigoles ou de dépressions ont été aménagés. Des bassins de captage, munis d'avaloirs afin de laminer les débits de pointe, ont été aménagés aux sorties de rigoles présentant un potentiel élevé de transport de sédiments.

#### **Rivière LaGuerre**

Les eaux de surface du bassin de la rivière LaGuerre sont évacuées artificiellement dans le lac Saint-François par une station de pompage. Compte tenu de la position relativement basse du bassin *Intervention* dans le paysage, le contrôle artificiel du débit de la rivière crée des refoulements épisodiques de son écoulement. L'inondation nuit à l'implantation et à la survie de la végétation en bas de talus, ce qui se traduit par une instabilité des berges de cours d'eau. La branche 16, qui était la plus affectée par ce phénomène, fut réaménagée en adoucissant les talus (pente 1,5:1) et en stabilisant les rives par des techniques de génie-végétal (plantation d'arbustes 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, favorise 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 démontré 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 a pour objectif de favoriser son infiltration au champ, laminer les pointes de crue et 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.

### **Ruisseau Walbridge**

Le bassin d'intervention du ruisseau Walbridge présente le relief le plus accidenté du réseau. Le terrain vallonné favorise la concentration du ruissellement de surface, qui mobilise à certains endroits d'importants volumes d'eau importants chargés de sédiments. Ces derniers tendent à s'accumuler dans les sections de fossé ou de cours d'eau à plus faible pente. Compte tenu de l'instabilité du réseau dans ces zones hydrologiquement sensibles, la pente des talus fut adoucie (pente de 1,5 :1) et les talus ensemencés d'un mélange herbacé. Les endroits les plus instables ont bénéficié d'une stabilisation par génie végétal ou par des empierrements, alors qu'une bande riveraine arbustive était aménagée en haut de talus. L'aménagement de rigoles d'interception et de bassins de captage, combinés à des structures avaloirs, doit compléter l'aménagement des secteurs où se concentre d'importantes lames de ruissellement de surface afin d'atténuer le transport des sédiments, tout en favorisant l'évacuation souterraine du ruissellement.

### **3.0 Communications et activités scientifiques**

Parallèlement aux rencontres communautaires régulières réunissant les 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. La liste des publications est annexe en annexe VI. Le projet a par ailleurs servi de plate-forme de formation sur le thème de l'intervention communautaire et la gestion intégrée des eaux à l'échelle du bassin versant auprès d'intervenants externes au projet, notamment dans le cadre des activités de formation continue du réseau des Clubs-conseil en agroenvironnement, des répondants de l'Union des producteurs agricoles en agroenvironnement (UPA), du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) et de l'Ordre des agronomes du Québec. Conformément au plan de visibilité, le soutien financier du FAQDD et de son partenaire financier le Gouvernement du Québec a été souligné lors de chacune des communications orales et écrites associées à ces évènements.

Au plan scientifique, certaines réalisations du projet ont été intégrées à des communications de portée internationale, notamment à l'occasion du symposium de *'Aquatic Ecosystem Health and Management'* (Lyon, 2003), du Symposium du Consortium de recherche sur le Lac Champlain (Saint-Jean, Qc, 2002) et de la Société canadienne de la science du sol, conjointement à la 4<sup>e</sup> conférence internationale sur les Mycorhizes (Montréal, 2003).

La réalisation du présent projet s'est par ailleurs enrichie d'un volet microbiologique financé par le Centre de développement de l'agriculture du Québec (CDAQ). Sous la coordination de Caroline Côté, chercheure à l'IRDA, et de Sylvain Quessy de la Chaire de recherche en salubrité des viandes (Université de Montréal), le projet supporte une caractérisation de la dynamique d'indicateurs microbiens de contamination fécale de l'eau (coliformes fécaux, *E. coli*, *Salmonella*) et la mise au point de techniques de détection et de caractérisation de *Cryptosporidium* et *Giardia* dans l'eau brute. Les infrastructures de recherche des bassins du Walbridge et de la Fourchette sont mises à contribution dans le cadre de cette étude. Les données biophysiques et agronomiques cumulées dans le cadre du présent projet supporteront l'interprétation de la dynamique microbienne des cours d'eau.

En terminant, soulignons que le développement de tels ensembles de données à l'échelle du bassin versant constitue un précieux atout pour le développement d'outils de gestion agroenvironnementale adapté aux conditions climatiques québécoises. L'intégration au plan spatial des données du suivi agronomique avec les particularités biophysiques du parcellaire en culture dans des systèmes d'information géographique (SIG) permettent l'alimentation de modèles hydrologiques pertinents à la prédiction du ruissellement, de l'érosion et du transport de sédiments et de nutriments. Les suivis hydrométriques et de la qualité de l'eau supportent pour leur part la calibration et la validation de ces modèles. Ainsi, les caractérisations du milieu terrestre, des systèmes de production agricole et de l'écosystème aquatique supportées par le présent projet constituent une plate-forme de développement valorisée dans la réalisation d'autres activités de recherche. La calibration et la validation de modèles hydrologiques pour bassin versant de la Rivière aux Brochets est notamment alimentée par les données des bassins expérimentaux Walbridge (Lévesque et al., 2003).

#### 4.0 Suites au projet

Le fonds FAQDD a soutenu les deux premières phases du projet, soit la calibration des régimes d'exportation des trois paires de bassins jumeaux et la phase d'aménagement. Conformément à son engagement initial, l'IRDA supportera la troisième phase du projet, soit l'évaluation de la réponse de la qualité de l'eau aux interventions agroenvironnementales réalisées dans les bassins Intervention. Cette étape requiert préalablement de compléter la phase d'aménagement du projet, soit notamment d'entretenir et de complémer au besoin les aménagements riverains et les structures de contrôle du ruissellement implantés en 2003. Ces démarches font appel à l'implication soutenue et concertée des propriétaires et des conseillers agricoles des Clubs agroenvironnementaux, du MAPAQ et à l'IRDA dans l'aménagement du parcellaire et l'implantation de pratiques agricoles de conservation. Les rencontres de projet prévues au cours de l'hiver 2004 permettront de faire le point sur les chantiers agroenvironnementaux dans le trois régions agricoles et de planifier les travaux à réaliser au printemps et à l'été.

Dans la mesure où l'implication des propriétaires et des partenaires dans les deux premières phases du projet est garante de l'avenir, le réseau est appelé à jouer un rôle structurant dans les démarches agroenvironnementales des communautés agricoles des bassins des rivières Aux Brochets, Etchemin et LaGuerre :

- les suivis hydrométrique et de qualité de l'eau supportés en phase de calibration de projet ont permis d'établir une balise environnementale fiable, qui permettra de mesurer l'évolution de la qualité de l'eau dans les bassins du réseau;
- l'approche originale d'atlas agroenvironnemental développée dans le cadre du projet est transférable à de plus larges échelles, afin de soutenir le diagnostic, la planification stratégique et la mise en œuvre d'actions agroenvironnementales en bassins versants agricoles;
- enfin, les aménagements riverains réalisés dans le cadre du présent projet, d'une ampleur inédite à notre connaissance en milieu agricole au Québec, constitue un banc d'essai pour la gestion communautaire de telles infrastructures.

En terminant, soulignons que le principal mérite du réseau d'actions concertées en bassins versants ne réside pas tant dans sa portée technique ou scientifique, mais se mesure bel et bien à l'échelle humaine. L'investissement unanime des producteurs agricoles dans l'aménagement de leurs bassins versants témoigne d'une responsabilisation et d'un engagement hors du commun à l'égard des enjeux environnementaux. Ce témoignage de *solidarité environnementale* envers la communauté s'inscrit de façon bien concrète dans l'axe du développement durable, où «la pensée globale et l'agir local» prennent tout leur sens.

## Références citées

- Deslandes, J., A.R. Michaud, et F. Bonn. 2002. Développement et validation d'indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore dans le bassin versant de la rivière aux Brochets. *Agrosol* 13(2) 111-123.
- 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): 140-148.
- Lévesque, G., J. Deslandes et A.R. Michaud. 2003. Mise en œuvre du modèle SWAT sur le bassin versant de la rivière aux Brochets. Mémoire (DESS), Système d'information Géographique et Gestion de l'Espace. Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement, Université Jean Monnet de Saint-Étienne et École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne
- Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. Description du système de transfert du phosphore dans le bassin versant du ruisseau au Castor. *Agrosol* 13(2): 124-139.
- 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 et S.J. Smith. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus un agricultural runoff. *J. Env. Qual.* 20:235-238.
- Statistical analysis system. 2000. SAS 8.0 pour Windows. SAS Institute Inc.
- Standard Methods For Examination of Waste and Waste Water, 18<sup>th</sup> Edition. 1992a. Edited by: Arnold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri and Andrew D. Eaton, ISBN 0-87553-207-1, p. 4-84, No: 4500-NH<sub>3</sub> H. Automated Phenate Method .
- Standard Methods For Examination of Waste and Waste Water, 18<sup>th</sup> Edition. 1992b. Edited by: Arnold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri and Andrew D. Eaton, ISBN 0-87553-207-1, p. 4-91, No: 4500-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> F. Automated Cadmium Reduction Method .
- 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.