

## RAPPORT FINAL

# ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DU RECOURS AUX LAITIERS SIDÉRURGIQUES DANS LA CONFECTION D'AMÉNAGEMENTS HYDRO-AGRICOLES

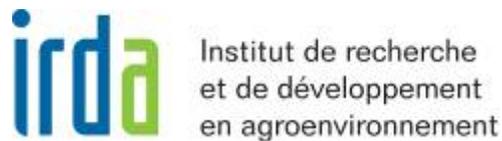
Projet de recherche et développement présenté au  
*Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec*

(Projet no.6081)



Préparé par:

Aubert Michaud, IRDA  
Jacques Desjardins, IRDA



En Partenariat avec:



Québec, Décembre 2009

## **ÉQUIPE DE RÉALISATION**

### **Institut de recherche et développement en agroenvironnement**

Aubert Michaud, Chercheur, coordonnateur de projet

Jacques Desjardins, Aménagements hydro-agricoles

Michèle Grenier, bio-statistique

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

### **Coopérative de solidarité du bassin versant de la Rivière aux Brochets**

Marcel Heyligen, producteur agricole

### **Ministère de l'Agriculture, Pêcheries et Alimentation**

Richard Lauzier, agronome et conseiller en aménagement hydro-agricole

### **MultiServ Harsco**

Michel Piché, représentant, projets spéciaux

## TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>3</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>4</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>5</b>
<b>1 DESCRIPTION DU PROJET</b> .....	<b>6</b>
1.1 MISE EN CONTEXTE DE L'ÉTUDE .....	6
1.2 OBJECTIFS .....	10
1.3 MÉTHODOLOGIE.....	11
<i>Description du site expérimental</i> .....	11
<i>Aménagement des dispositifs expérimentaux</i> .....	12
<i>Monitoring des dispositifs et dosages analytiques</i> .....	14
<i>Observations visuelles sur le terrain</i> .....	15
<i>Analyses statistiques</i> .....	15
<b>2 RÉSULTATS ET ANALYSE</b> .....	<b>16</b>
2.1 CONDITIONS HYDROLOGIQUES ET TEMPS DE RÉTENTION.....	16
2.2 PH .....	20
2.3 MATIÈRES EN SUSPENSION .....	23
2.4 PHOSPHORE .....	23
<b>3 DIFUSION DES RÉSULTATS</b> .....	<b>26</b>
<b>4 HISTOIRE D'UNE RÉUSSITE</b> .....	<b>26</b>
<b>5 PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES</b> .....	<b>28</b>
<b>6 RÉFÉRENCES CITÉES</b> .....	<b>28</b>

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1. Structure de captage aménagée à l'exutoire d'un fossé tributaire de la branche principale du Ruisseau au castor (a) et bande riveraine arbustive implantée le long du même cours d'eau (b).....	8
Figure 2. Schéma d'aménagement des structures de captage du ruissellement (vue en plan). .....	11
Figure 3. Plan aérien des trois sites expérimentaux.....	12
Figure 4. Vue de profil des structures de captages aménagées en août 2006 (a) et modifiées en octobre de la même année (b).....	13
Figure 5. Dispositifs de collectes et de mesures mis en place aux sites expérimentaux incluant la conduite d'évacuation munie d'un clapet anti-retour (a), l'échelle limnimétrique installée dans le ruisseau (b), le collecteur de ruissellement de surface (c) et le puits d'accès au lit de laitiers sidérurgiques (d). .....	14
Figure 6. Disposition des laitiers sidérurgiques dans les fossés avaloirs.....	16
Figure 7. Lames journalières de ruissellement de surface (adapté de Michaud et col., 2005, 2009) et observations du pH (a), des concentrations de matières en suspension (b) et du phosphore total (c) en fonction des différentes campagnes d'échantillonnage aux trois sites expérimentaux.....	18
Figure 8. Distribution des durées de rétention du ruissellement de surface en fonction des hauteurs journalières d'eau ruisselées (adapté des résultats de modélisation hydrologique du bassin versant du ruisseau Au Castor ; Michaud et col., 2007). .....	19
Figure 9. Paires d'observations du pH (a), des concentrations de matières en suspension (b) et des concentrations en phosphore total (c) associées aux échantillons prélevés en amont et en aval du lit de laitiers sidérurgiques pour les trois sites expérimentaux.....	20

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1. Moyennes arithmétiques des variables de qualité de l'eau en fonction de la saison d'échantillonnage, de la classe de régime hydrique et de la position amont vs aval du lit de laitiers sidérurgiques. .... 19

Tableau 2. Valeurs F et probabilités associées aux effets et interactions des laitiers sidérurgiques (POSITION) et du temps (SAISON) dans le modèle d'analyse de variance appliqué aux observations de qualité de l'eau. .... 22

Tableau 3. Moyennes ajustées au modèle de variance des variables de qualité de l'eau en fonction de la position amont vs aval du lit de laitiers sidérurgiques et de la saison d'échantillonnage. .... 22

## 1 DESCRIPTION DU PROJET

La présente étude constitue un premier banc d'essai au Québec pertinent à l'évaluation au champ du recours aux matériaux fixatifs du phosphore (P) dans la prévention de la mobilité diffuse du P. L'étude s'inscrit en continuité des différents essais réalisés en laboratoire et en milieu naturel dans le contrôle des sources ponctuelles de P, notamment en pisciculture, qui témoignaient du potentiel élevé de rétention du phosphore des laitiers sidérurgiques des fourneaux à arc électrique de la compagnie MultiServ Harsco, localisée à Contre-Cœur au Québec. Le recours à ces matériaux a donc été envisagé comme un moyen peu coûteux de bonifier l'efficacité environnementale des ouvrages de contrôle du ruissellement de surface mises en place dans le cadre d'actions concertées en bassins versants agricoles et ciblés sur la réduction des charges diffuses de P vers les cours d'eau. Alors que les structures de captage favorisent la rétention des fractions particulières du P par le laminage de lame de ruissellement de surface et la sédimentation, la présente étude a vérifié l'hypothèse que les laitiers sidérurgiques pouvaient jouer un rôle complémentaire en fixant les formes solubles de P.

### 1.1 Mise en contexte de l'étude

Problématique agroenvironnementale du phosphore. Dans plusieurs régions agricoles du Québec, les problématiques de contamination des eaux de surface interpellent particulièrement le monde agricole. C'est le cas notamment de la région de la Baie Missisquoi ciblée pour la réalisation du présent projet. La prolifération de cyanobactéries dans cette portion du Lac Champlain est de loin le cas le plus sévère au Québec (Blais, 2002). Elle y entraîne depuis plusieurs années une perturbation sévère des activités récréatives et des problèmes d'approvisionnement pour la station de traitement d'eau potable locale. En raison des toxines produites par ce plancton, mi-végétal, mi-bactérien, le développement de fleurs d'eau demeure une sérieuse préoccupation de santé publique. L'apport de phosphore demeure un facteur prépondérant dans les successions algales qui favorisent la colonisation par les cyanobactéries. Reconnaisant le rôle déterminant des apports de P sur la dégradation de l'écosystème de la baie Missisquoi, 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'effort de réduction de la charge de phosphore pour le Québec (40%) représente  $27 \text{ T P an}^{-1}$ , alors qu'il se situe à  $43 \text{ T P an}^{-1}$  au Vermont (60%). Dans les deux cas, il s'agit d'une réduction d'environ 41% de la charge annuelle totale.

Depuis la fin des années '90, la réduction des flux de P dans la baie Missisquoi mobilise particulièrement les intervenants du secteur agricole, alors qu'il est estimé qu'environ 79% de la charge annuelle de P vers la baie est attribuée à l'agriculture, qui occupe 26 % du bassin versant (Hegman et al., 1999). Plusieurs initiatives concertées d'intervenants du secteur agricole de la région ont ainsi été entreprises avec pour objectif de prévenir les exportations diffuses de phosphore. La coopérative de solidarité de la rivière aux Brochets, une organisation de producteurs essentiellement dédié à l'aménagement

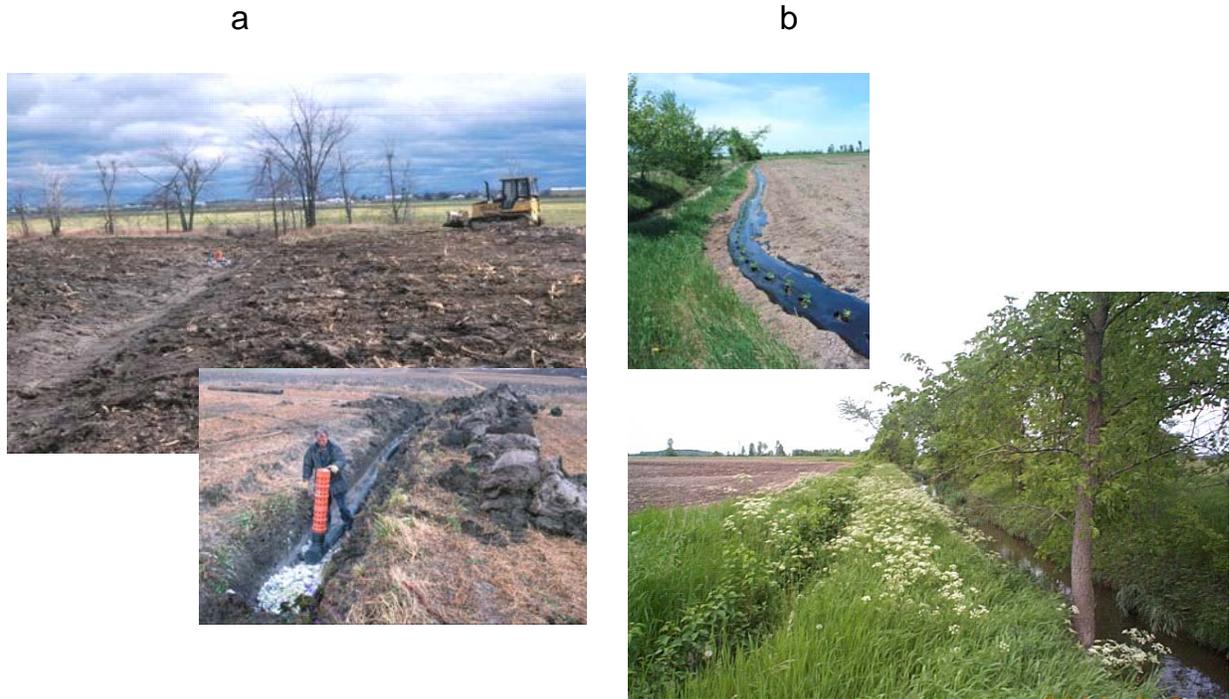
agroenvironnemental des terres, est particulièrement active dans la promotion et la réalisation d'aménagements riverains et d'ouvrages de contrôle du ruissellement. Les syndicats de base de l'UPA, le Club-conseil Dura-Club et les ressources-conseil du MAPAQ, du MDDEP, de même que la Corporation du bassin versant de la baie Missisquoi (CBVBM) sont aussi actifs dans la promotion et la réalisation d'actions concertées ciblées sur la mise en valeur du bassin versant.

Le bassin versant de la Rivière aux brochets, principal tributaire de la baie Missisquoi en territoire québécois est par ailleurs devenu une « région laboratoire » d'étude de la mobilité du phosphore en milieu agricole. Les initiatives de recherche en partenariat impliquant l'IRDA, les universités McGill, Laval et de Sherbrooke et plusieurs intervenants locaux du monde agricole a permis 1) de développer une meilleure compréhension des processus de mobilisation du P sur les terres agricoles, 2) de supporter le développement d'outils de gestion du parcellaire et 3) de mesurer les effets des interventions agroenvironnementales sur la qualité des eaux de surface. Dans l'ensemble, un important constat qui se dégage des études réalisées à l'échelle de la parcelle expérimentale (Michaud et Laverdière, 2004), du champ (Enright et Madramootoo, 2004), du bassin expérimental (Michaud et al., 2002; 2004, 2005, 2009b) ou en modélisation à l'échelle du bassin versant (Deslandes et al., 2002; Michaud et coll., 2007) est toute l'importance à accorder aux facteurs « Transport » dans la mobilisation du P. Rejoignant les observations récentes exprimées dans la littérature scientifique en Amérique et en Europe du Nord, il est constaté que la majeure partie des exportations diffuses de phosphore du parcellaire en culture est associée au ruissellement de surface sur des portions relativement restreintes des champs. Ces observations tendent à confirmer l'importante contribution des structures de contrôle du ruissellement dans les stratégies de réduction des charges de P aux ruisseaux, en complémentarité aux pratiques culturales de conservation implantées à l'échelle du champ.

Les structures de captage (avaloirs), bassins de sédimentation, seuils, rigoles d'interception, voies d'eau ou tranchées filtrantes permettent de réduire l'exportation nette de phosphore par leur action sur l'intensité et la vitesse du ruissellement et le bris de la connectivité entre le champ et le réseau de fossés et de ruisseaux. Il en résulte un laminage des crues à prédominance de ruissellement de surface, une réduction des particules de sol arrachées et transportées (auxquelles est associée une importante fraction du P exporté), de même que le piégeage des sédiments avant leur exportation dans le ruisseau. Le suivi de la qualité de l'eau du bassin versant du Ruisseau au castor (24 fermes, 10 km<sup>2</sup>), a notamment permis de documenter une diminution des exportations diffuses de P de l'ordre de 25% suite à l'aménagement de bandes riveraines et de structures de contrôle du ruissellement de surface sur les portions du parcellaire les plus sensibles à la génération de ruissellement de surface (Michaud et al., 2005).

La réalisation d'ouvrages de contrôle du ruissellement fait généralement appel à de l'enrochement afin de garantir la stabilité des aménagements (figure 1) Des matériaux du type « tout venant de carrière » sont généralement importés sur le lieu de l'aménagement, lorsque les matériaux ne sont pas disponibles sur la ferme. En date, aucune attention n'a

été accordée aux propriétés des matériaux utilisés à l'égard de leur aptitude à fixer le phosphore ou autres sources de contamination des eaux de surface.



**Figure 1. Structure de captage aménagée à l'exutoire d'un fossé tributaire de la branche principale du Ruisseau au castor (a) et bande riveraine arbustive implantée le long du même cours d'eau (b).**

Utilisation environnementale des matériaux fixatifs du phosphore. A partir du début des années 90s, le potentiel de fixation du phosphore de différents matériaux a été principalement expérimenté dans le contexte de marais filtrants. Les recherches supportant les nouvelles générations de marais filtrants, spécifiquement ciblés sur la rétention du phosphore, se sont d'abord tournées vers les matériaux d'origine naturelle ou industrielle dans le cadre d'expérimentations en laboratoire. Le recours aux « filtres actifs » met alors à profit les capacités de fixation physico-chimique des matériaux utilisés dans l'assainissement d'effluents contaminés, de façon complémentaire aux processus de piégeage physique et de mobilisation biologique. Ces travaux ont démontré que les principaux processus de rétention actifs dans la rétention du P sont l'adsorption et la complexation avec le fer, l'aluminium ou le calcium. Les matériaux testés sont peu coûteux, abondants et présentent des caractéristiques physico-chimiques désirables (Mann and Bavor, 1993; Johansson, 1997; Zhu et al. 1997; Drizo et al., 1999). Plusieurs expérimentations ont eu cours sur des matériaux riches en oxydes (Ca, Al, Fe, & Mn) dans différents laboratoires à travers le monde afin de déterminer leur capacité de fixation du P, incluant différents graviers, cendres, argiles (light expanded clay aggregates - LECA), calcaires, scories d'aciérie, sables, etc. Des revues de littérature sur ces différentes expérimentations ont été publiées par Forget (2001), Drizo et al (2002) et plus récemment par Johansson et Westholm (2006). Une conclusion générale qui se dégage

de ces revues est à l'effet que les laitiers d'aciérie provenant de fours à arc électrique possèdent le meilleur potentiel à retenir le P des eaux usées. Ces résidus résultent de la combustion dans des fours à arc électrique de minerai de fer ou de ferraille, auquel s'ajoute de la chaux au cours du processus.

Les premières études sur les laitiers sidérurgiques ont été réalisées au Japon par Yamada et al (1986). Le potentiel de fixation de ces matériaux a par la suite été validé en laboratoire par Mann (1997), Baker et al (1998), Johansson (1998) et Johanson and Gustafson (2000). Au Québec, Forget (2001) et Drizo et al, (2000 ; 2002) ont conduit les recherches en laboratoire parmi les plus exhaustives sur le sujet, par la caractérisation de 57 matériaux différents disponibles dans la région du Sud-Ouest québécois. De ces matériaux, les scories provenant des fours à arc électrique ont démontré le meilleur potentiel de rétention du P. Au cours des années 2000/2003, le groupe de recherche de l'École Polytechnique de Montréal a démontré l'efficacité de ces scories au moyen de dispositifs en colonnes de (40-120 L), alimentés par des solutions de P à des concentrations variant de 20 à 400 ppm, et selon des périodes de rétention de l'ordre de 6 à 120 heures. Ces études ont confirmé une rétention du P dans les scories de l'ordre de 85-95% (Forget, 2001; Soulard, 2001; Drizo et al, 2002, Lospeid, 2003). Sur la base des études précédentes, Weber et Drizo (2005) ont développé au Vermont des filtres adaptés au traitement des effluents d'élevage laitier. À l'échelle internationale, cette expérimentation constitue une première application agroenvironnementale dans le traitement d'effluents laitiers. Au cours des 12 premiers mois de l'expérimentation, des réductions de l'ordre de 75-90% ont été documentées pour des périodes de rétention de 12 à 24 heures. (Weber et Drizo, 2005 ; Drizo et al, 2006).

Au plan environnemental, les laitiers sidérurgiques québécois ont trouvé quelques autres applications en déphosphoration d'eaux usées, confirmant un excellent potentiel de fixation du P. Au Biodôme de Montréal par exemple, les laitiers sidérurgiques sont utilisés pour abaisser d'un facteur 10X la teneur des eaux enrichies par les déjections animales des pensionnaires. Un temps de réaction de 24 heures permet de réduire la teneur des eaux usées de 20 à 2 ppm. En pisciculture, le recours aux laitiers sidérurgiques est présentement à l'étude à Saint-Damien-de-Buckland au Québec dans l'assainissement des eaux usées. Pour la seule partie du système ayant recours aux lits de laitiers sidérurgiques provenant de fours à arc électrique, le rendement rapporté est de l'ordre de 84 % de réduction, pour une concentration initiale variant de 3 à 8 ppm P (Comeau, 2004). Plus récemment, à Alfred, en Ontario, les laitiers sidérurgiques sont présentement en évaluation dans le traitement des effluents de l'usine de traitement des eaux usées municipales (Crolla, 2006).

En ce qui a trait à l'innocuité environnementale du produit, l'ensemble de la revue de la littérature à ce sujet ne révèle pas de problématique de contamination des eaux liée à l'utilisation des laitiers sidérurgiques. Quant aux produits spécifiquement ciblés pour la présente étude, les études réalisées au Biodôme de Montréal et à la pisciculture expérimentale de Saint-Damien-de-Buckland ont démontré l'innocuité du matériel utilisé.

Applicabilité des scories en aménagement hydro-agricole. Actuellement, la réduction des charges de phosphore associée aux ouvrages de contrôle de ruissellement est redevable en bonne partie à la sédimentation provoquée dans la colonne d'eau retenue. Théoriquement, une période de rétention du ruissellement de surface de l'ordre de 12 heures est associée à une rétention de 68% des sédiments et à 42% du phosphore total (Young et al., 1996). De telles périodes de rétention semblent compatibles avec un temps de réaction des eaux évacuées avec les scories permettant une adsorption/complexation significative du P. Rappelons qu'une rétention de l'ordre de 75 à 90% a été documentée par l'équipe du Vermont sur des effluents laitiers pour une période de contact de l'ordre de 12 heures. Cette réaction relativement rapide reflète l'état des connaissances en science du sol qui rapportent que les processus d'adsorption du P sont très rapides. Dans le cadre d'études réalisées au Québec au moyen de phosphore « marqué » (isotopique P-32), Tran et al. (1988) ont documenté qu'une très large proportion des réactions d'adsorption se produisaient dans les minutes suivant le contact entre le P labile en solution et les composantes adsorbantes du sol. La forte capacité adsorbante des laitiers sidérurgiques pour le phosphore en solution est d'autant plus intéressante dans un contexte d'aménagement hydro-agricole. Alors que les processus de sédimentation sont réputés retenir les fractions particulières du P, la fixation chimique du P soluble jouera un rôle complémentaire au processus physique de piégeage. Rappelons que les fractions solubles de P ont un impact direct sur le milieu aquatique, car ces formes sont totalement biodisponibles pour les plantes aquatiques et les cyanobactéries. Les expérimentations réalisées dans la région de la baie Missisquoi ont démontré que le P particulaire du ruissellement des terres présente pour sa part une biodisponibilité de l'ordre de 51 à 86% selon la richesse des sols (Michaud et Laverdière, 1984).

## **1.2 Objectifs**

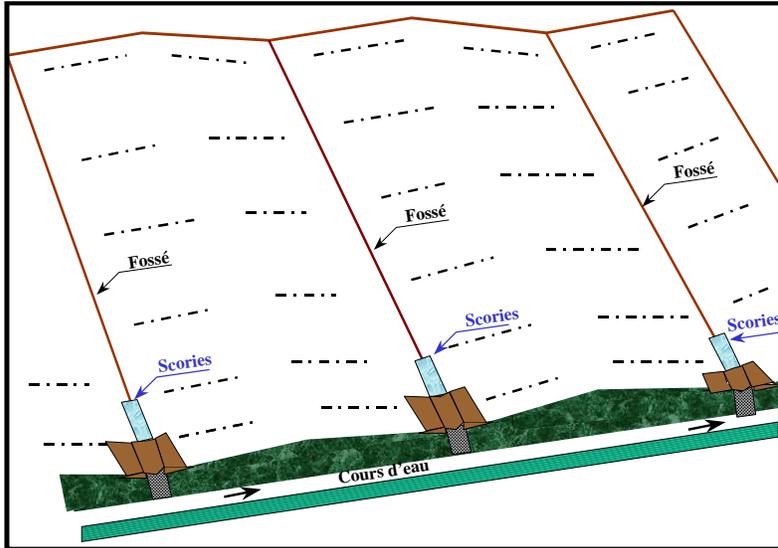
La présente étude avait pour objectif principal d'évaluer le potentiel des laitiers sidérurgiques, provenant des fourneaux à arc électrique, à bonifier la performance environnementale des ouvrages de contrôle du ruissellement, et plus particulièrement la réduction des exportations biodisponibles de phosphore vers les milieux aquatiques.

De façon plus spécifique, les mesures prises répondaient aux objectifs suivants :

- Mesurer l'efficacité de la rétention du phosphore (P) associée aux laitiers sidérurgiques utilisées dans la confection d'ouvrages de contrôle du ruissellement de surface.
- Valider l'innocuité environnementale des laitiers sidérurgiques utilisées dans l'aménagement hydro-agricole du parcellaire en culture.
- Encadrer, au moyen d'un ensemble de recommandations techniques, le recours aux laitiers sidérurgiques dans la confection d'ouvrages de contrôle du ruissellement de surface afin d'optimiser le piégeage du phosphore.
- Évaluer la pertinence et le rapport coût/bénéfice de structures de contrôle du ruissellement recourant aux laitiers sidérurgiques dans une stratégie globale de réduction des exportations diffuses de phosphore à l'échelle d'un bassin versant.

### 1.3 Méthodologie

La réalisation de l'étude a permis l'évaluation au champ de la rétention du phosphore de fossés-avaloirs remblayés avec des laitiers sidérurgiques des fourneaux à arc électrique de la compagnie MultiServ Harsco. Le dispositif expérimental comprenait trois répétitions de dispositifs de captage aménagés à l'exutoire de fossés de ferme (figure 2).



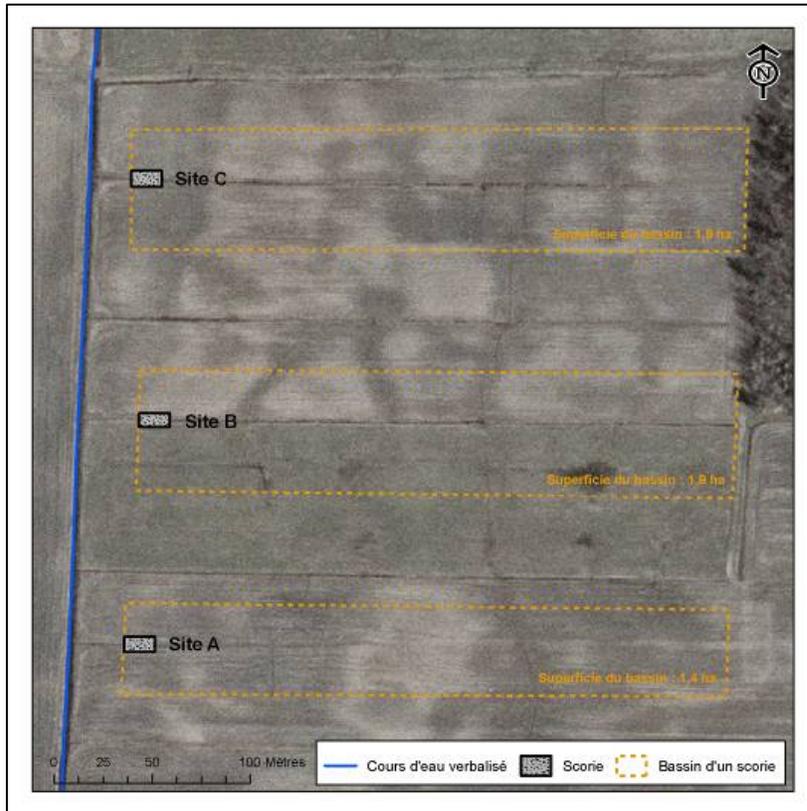
**Figure 2. Schéma d'aménagement des structures de captage du ruissellement (vue en plan).**

#### Description du site expérimental

Les trois dispositifs combinant des avaloirs et des tranchées filtrantes comblées de laitiers sidérurgiques, ont été installés aux exutoires de fossés de ferme drainant des parcelles adjacentes, présentant des superficies drainées similaires. Les trois sites expérimentaux sont exploités par la même entreprise agricole, située à Notre-Dame de Standbridge dans la région de la Montérégie. Les parcelles ont un relief légèrement vallonné, avec des pentes de l'ordre de 0,1 à 3 %. Le drainage de surface est assuré par des planches en faîte, mais présente de nombreuses dépressions. Les parcelles ne sont pas drainées souterrainement et présentent des caractéristiques similaires au plan pédologique. La série Sainte-Rosalie, en phase loam argileuse, occupe les portions les plus basses des parcelles, à proximité du cours d'eau, alors que le loam argileux graveleux Saint-Sébastien occupe les secteurs les plus élevés des parcelles. L'aménagement hydro-agricole des parcelles de même que la nature peu perméable du sol y favorisent l'émission de ruissellement vers les fossés de ferme.

La figure 3 illustre la configuration des trois sites expérimentaux. Le fossé du site A égoutte une superficie d'environ 1,4 hectares, alors que les sites B et C drainent des superficies similaires de l'ordre de 1,9 hectares. Au cours de la période d'étude, les

parcelles adjacentes aux fossés A et C, de même que le secteur drainé vers le fossé B ont été cultivées en maïs-grain. L'autre moitié de la superficie drainée vers le fossé B a plutôt profité d'une culture de prairie. Compte tenu de la vocation de l'entreprise agricole, la fertilisation des parcelles au cours de la période d'étude s'est limitée aux engrais minéraux.



**Figure 3. Plan aérien des trois sites expérimentaux.**

#### Aménagement des dispositifs expérimentaux

Les trois dispositifs mis en place aux exutoires des fossés sont similaires et comportent quatre composantes, soit :

- un collecteur du ruissellement en provenance du fossé localisé en amont de la structure de captage;
- une tranchée filtrante comblée par des laitiers sidérurgiques;
- un puit d'accès permettant d'échantillonner le ruissellement au sortir du lit de laitiers ;
- une conduite d'évacuation du ruissellement vers le fossé.

La figure 4a illustre les aménagements réalisés en août 2006. Suivant l'excavation des tranchées de longueur approximative de 20 mètres tout au long des sections d'écoulement du fossé, les laitiers ont été disposés en vrac de façon à en optimiser le contact avec le

ruissellement de surface. Compte tenu des profondeurs propres à chacun des fossés, les quantités de laitiers apportés dans les fossés sont de l'ordre de 7, 9 et 15 tonnes, respectivement, pour les sites A, B et C. Une conduite perforée collecte les eaux de ruissellement suivant leur percolation au travers des scories, puis évacue l'eau vers le cours d'eau au moyen d'une conduite fermée. L'installation des puits d'accès (figure 5) a par ailleurs permis l'échantillonnage des eaux de lixiviation directement dans la conduite fermée. Une trappe anti-retour a également été installée à l'exutoire de la conduite d'évacuation afin d'éviter le refoulement de l'eau du ruisseau dans la conduite en période de crue.

En octobre 2006, suivant la collecte des premiers échantillons témoignant de faible rétention de P, les aménagements ont été modifiés de façon à maintenir en continu de l'eau de ruissellement dans lits de laitiers et de réduire le débit d'évacuation. Des digues ont ainsi été aménagées à environ 4 mètres en amont du début des tranchées filtrantes (figure 4b). Les digues conçues avec des membranes étanches maintiennent ainsi une hauteur d'eau de l'ordre de 20 à 50 cm de haut dans le lit de laitiers. Les conduites perforées sont aussi enveloppées de géotextiles afin de retenir les particules.

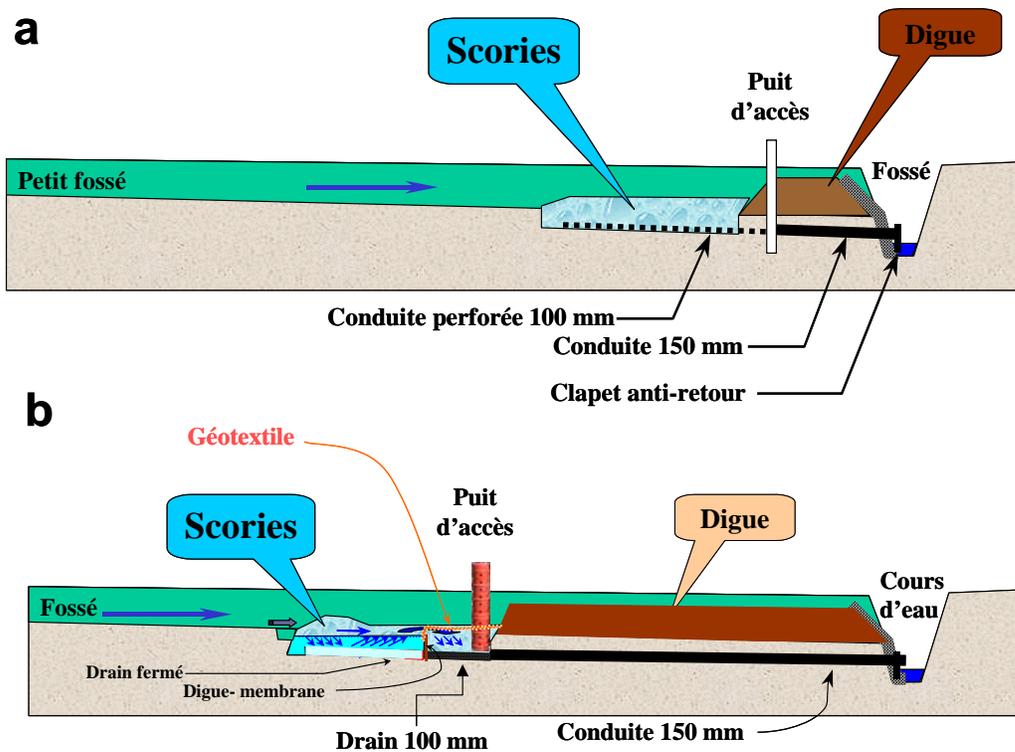


Figure 4. Vue de profil des structures de captages aménagées en août 2006 (a) et modifiées en octobre de la même année (b).



**Figure 5. Dispositifs de collectes et de mesures mis en place aux sites expérimentaux incluant la conduite d'évacuation munie d'un clapet anti-retour (a), l'échelle limnimétrique installée dans le ruisseau (b), le collecteur de ruissellement de surface (c) et le puits d'accès au lit de laitiers sidérurgiques (d).**

#### Monitoring des dispositifs et dosages analytiques

L'échantillonnage du ruissellement en amont du lit de laitiers (collecteur), de même qu'au puit d'accès à l'aval, a été supporté de façon manuelle. Au cours de la période d'étude, 31 campagnes d'échantillonnages des six points de prélèvements (3 sites X Amont/Aval) ont été réalisées. Lors des prélèvements aux puits d'accès, les hauteurs d'eau dans les lits de laitiers étaient mesurées. Les campagnes d'échantillonnage se sont réparties selon quatre périodes, soit à l'automne 2006, au printemps 2007, à l'été/automne 2007 et au printemps 2008. La fonte des neiges du début avril est associée aux plus importants événements de ruissellement de surface, alors que 13 campagnes d'échantillonnages ont été réalisées au cours de cette période. Durant l'été 2007, 4 événements majeurs ont fait l'objet d'échantillonnages et les autres échantillons ont été prélevés à l'automne 2006 et 2007.

Suivant l'échantillonnage, les échantillons 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 divers formes d'azote ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ), la spéciation du P en ses composantes réactives soluble, dissoute, particulaire, biodisponible et totale, et enfin

les principaux ions en solution. Les particules en suspension (MES) ont été déterminées par filtration à 0,45 µm (Greenberg et coll., 1992a). Le phosphore réactif dissous (P<sub>dissous</sub>) a été mesuré sur les échantillons filtrés (< 0.45 µm) en utilisant la méthode de Murphy et Riley (1962). Le phosphore biodisponible (P<sub>bio</sub>) 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<sub>total</sub>) a été mesurée sur un échantillon digéré par la méthode des persulfates (Greenberg et coll., 1992b). Les différentes formes d'azote : ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ont été mesurées selon le protocole de Greenberg et coll. (1992c). Le dosage du calcium et autres éléments en solution (K, Mg, Na, Al, B, Cu, Fe, Zn, Mn, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se) ont été réalisés selon le protocole de Greenberg et coll. (1992d).

### Observations visuelles sur le terrain

Des inspections régulières des lits de laitiers ont été réalisées afin de décrire l'évolution de leur structure au fil du temps. Ces inspections répondaient à la préoccupation de détecter une prise en masse du matériel, tel que documenté pour certains dispositifs expérimentaux, où des matériaux à fine granulométrie étaient valorisés. Une fine granulométrie des laitiers, conjuguée à la présence de CO<sub>2</sub> en raison de conditions d'écoulement non saturé, ont alors conduit à la cimentation du lit de laitiers. Dans le cas de la présente étude, les laitiers sélectionnés présentaient des grosseurs d'agrégats compris entre 10 et 30 mm, de façon à éviter le processus de cimentation. Cette granulométrie grossière, de même qu'une forme plus arrondie et plus irrégulière que la pierre concassé (figure 5), ont favorisé l'infiltration du ruissellement dans les lits de laitiers, qui n'ont démontré aucun symptôme de colmatage trois ans après leur mise en place.

### Analyses statistiques

Un modèle linéaire mixte a été ajusté au jeu de données de qualité de l'eau à l'aide de la procédure PROC MIXED de SAS. Le modèle comprend les effets fixes des facteurs *Position* (Amont vs aval du lit de laitiers), de la saison d'échantillonnage (4 périodes) ainsi que de l'interaction *Position* × *Saison*. Les effets aléatoires du modèle sont associés aux trois stations et aux 32 campagnes d'échantillonnages. Il a été supposé que les mesures avant et après les lits de laitiers (Amont et Aval) effectuées sur un même site lors d'une campagne d'échantillonnage étaient corrélées. Une structure de corrélation *UN* a donc été ajustée avec l'énoncé *REPEATED*. L'hypothèse selon laquelle la hauteur d'eau journalière ruisselée pourrait agir comme covariable dans le modèle a aussi été vérifiée. Les estimations journalières de ruissellement de surface générés à partir du dispositif de mesure à l'exutoire du bassin versant du ruisseau au Castor (Michaud et coll., 2009c), voisin immédiat du bassin où de drainent les sites de la présente étude, ont été mis à profit dans l'évaluation de cette hypothèse. Les graphiques des variables dépendantes en fonction des hauteurs d'eau ruisselées n'ont suggéré aucun lien entre ces dernières et les variables de qualité de l'eau. Les hauteurs d'eau journalières n'ont donc pas été ajoutées au modèle. À l'exception du pH, toutes les variables ont été transformées en log naturel afin de satisfaire les hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance des résidus.



**Figure 6. Disposition des laitiers sidérurgiques dans les fossés avaloirs.**

## **2 RÉSULTATS ET ANALYSE**

### **2.1 Conditions hydrologiques et temps de rétention**

Au total, 222 échantillons d'eau ont été prélevés sur les sites expérimentaux dans le ruisseau au cours des 32 campagnes d'échantillonnages entre l'automne 2006 et le printemps 2008. La figure 7 illustre la variabilité des observations de la qualité du ruissellement de surface en amont et en aval des structures de captage au cours de la période à l'étude. Afin d'apprécier les conditions hydrologiques à l'œuvre au moment des prises d'échantillons, les estimations de ruissellement journalier y sont également reproduites. Ces dernières sont dérivées des observations hydrométriques et géochimiques colligées à l'exutoire du bassin versant du ruisseau au Castor (Michaud et col., 2009), voisin immédiat du bassin versant où sont situés les trois sites expérimentaux. La distribution des hauteurs d'eau journalières au moment des échantillonnages met en relief une large gamme d'événements de ruissellement de surface, dont les intensités varient entre 1 et 23 mm/jr, pour une moyenne de 8 mm/jr. Ces hauteurs d'eau

journalières permettent d'estimer, sur une base théorique, les durées des périodes au cours desquelles le ruissellement était en contact avec les laitiers des structures de captage lors des différentes campagnes d'échantillonnage (figure 8). Considérant un volume moyen du lit de laitiers de l'ordre de  $10 \text{ m}^3$  et une superficie drainée 2 ha, les hauteurs journalières de ruissellement se traduisent en périodes de contact comprises entre une demie-heure (ruissellement journalier de 23 mm) et 15 heures (ruissellement journalier de 1 mm), pour une moyenne de 3,4 heures (figure 8) appliquée aux 32 campagnes d'échantillonnage.

La figure 9 illustre les observations instantanées de qualité de l'eau colligées en amont et aval de chacune des structures de captage. Cette représentation traduit l'effet du passage du ruissellement de surface au travers du lit de laitiers sur les différents paramètres de qualité de l'eau. Dans l'ensemble, la qualité du ruissellement de surface a été peu affectée par son passage dans les lits de scories. Le tableau 1 présente les moyennes (arithmétiques) des trois sites pour les paramètres de pH, MES et P en fonction des quatre saisons d'échantillonnage et du régime hydrique (hauteur ruisselée supérieure ou inférieure à 5 mm/jr). L'évaluation préliminaire de l'effet de la hauteur d'eau journalière sur les paramètres de qualité d'eau a démontré que ces derniers n'étaient pas affectés par l'intensité du ruissellement de surface. L'interprétation des résultats s'est donc contrée sur l'effet des lits de laitiers, de même que sur le facteur « temps », en comparant les résultats obtenus au cours des quatre saisons d'échantillonnage. Le pH est la propriété qui a été la plus affectée au cours de la période d'étude, particulièrement au cours des premières campagnes d'échantillonnages. Les structures de captage n'ont cependant eu qu'un effet marginal sur les concentrations de matières en suspension et en phosphore. Les sections suivantes présentent plus en détails les résultats pour ces différents paramètres de qualité d'eau.

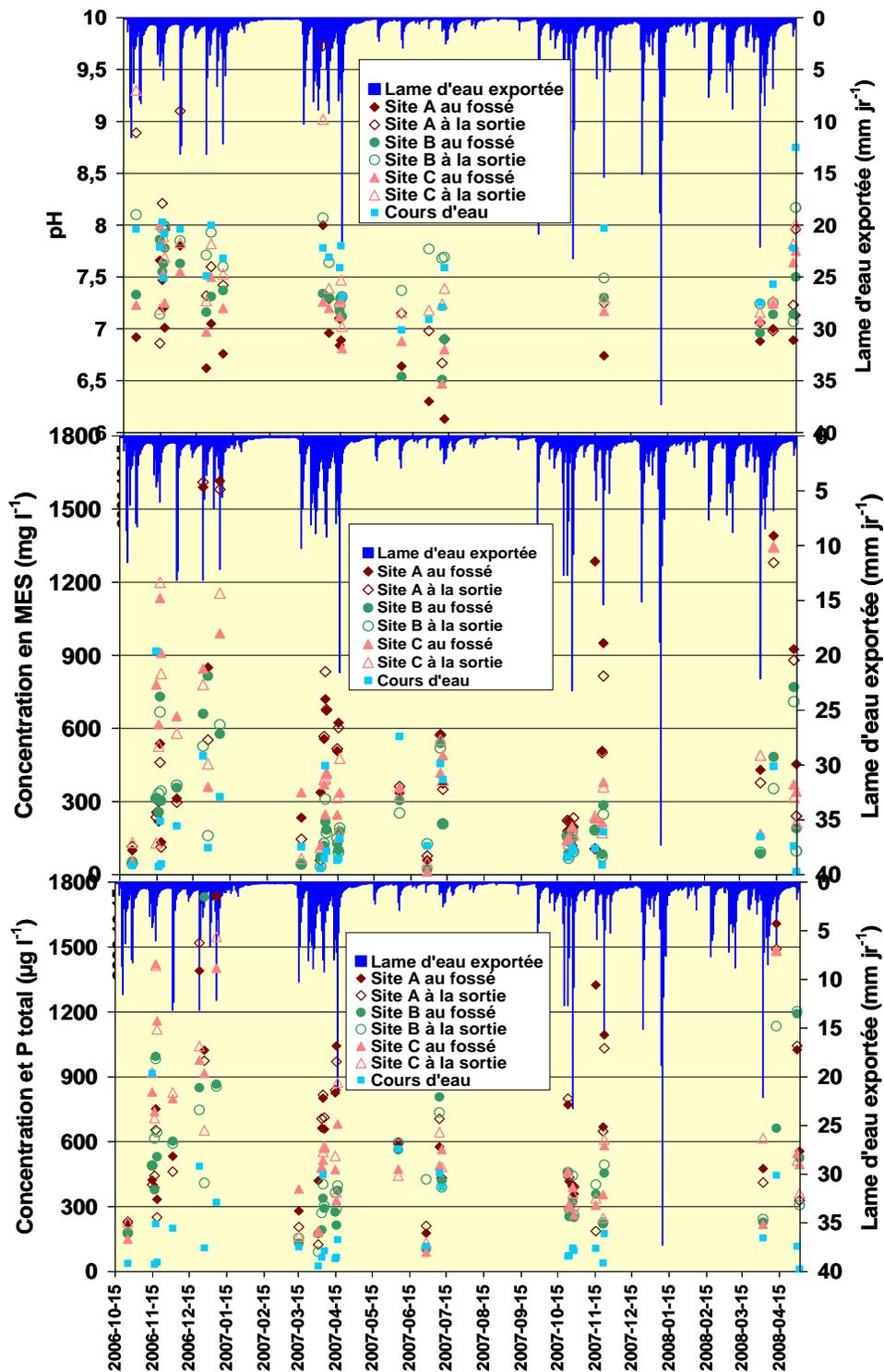


Figure 7. Lames journalières de ruissellement de surface (adapté de Michaud et col., 2009c) et observations du pH (a), des concentrations de matières en suspension (b) et du phosphore total (c) en fonction des différentes campagnes d'échantillonnage aux trois sites expérimentaux.

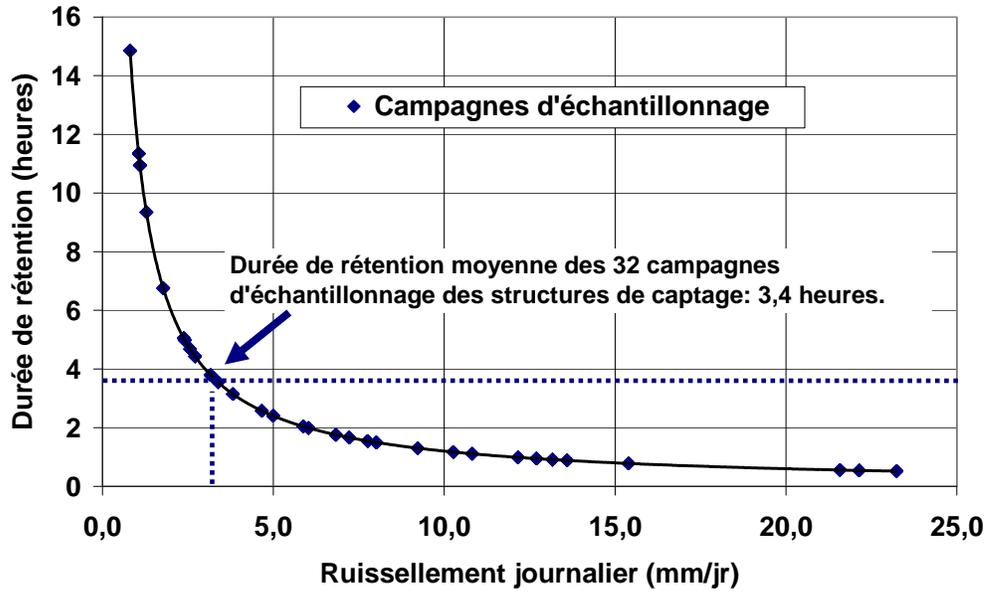
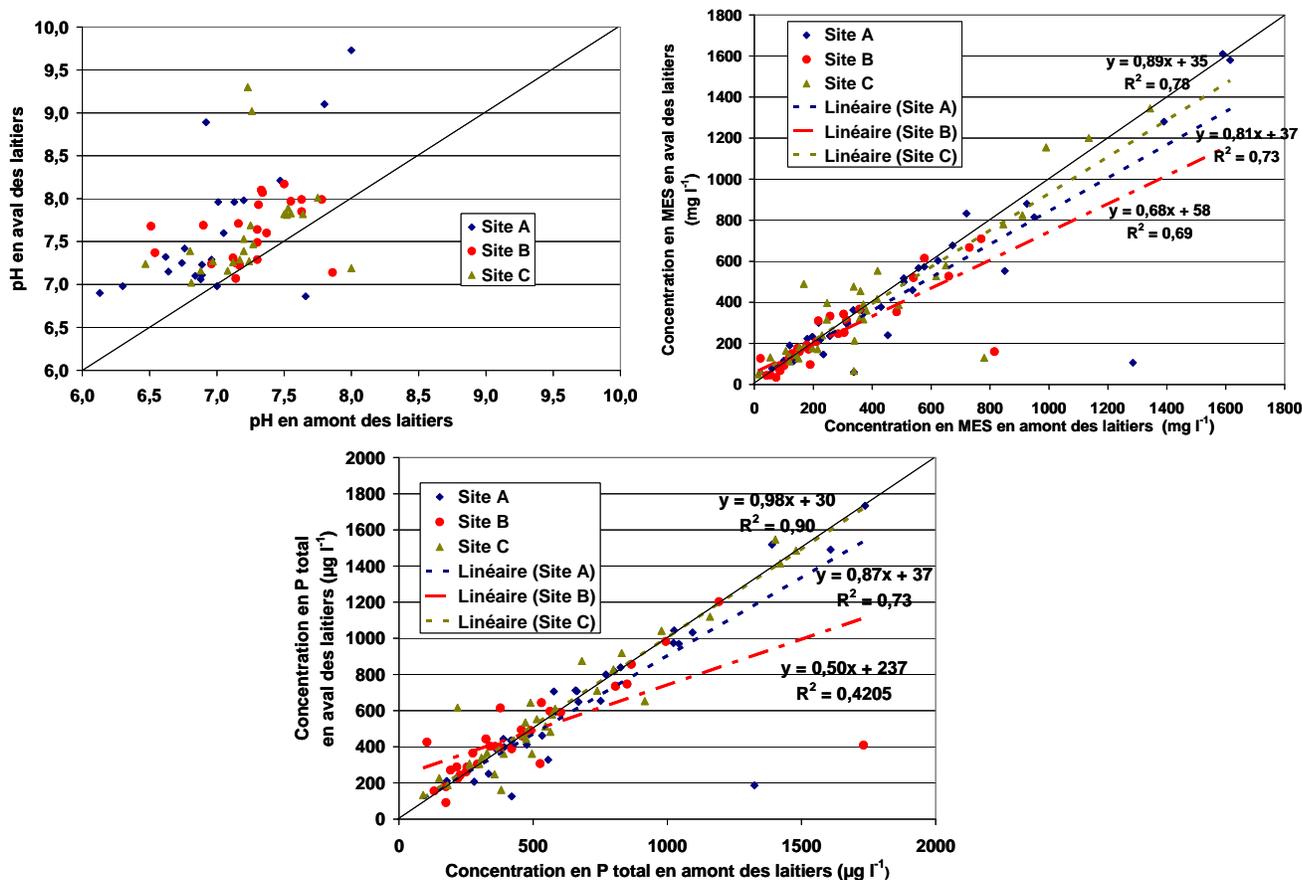


Figure 8. Distribution des durées de rétention du ruissellement de surface en fonction des hauteurs journalières d'eau ruisselées pour les 32 campagnes d'échantillonnage (adapté des résultats de Michaud et col., 2009c).

Tableau 1. Moyennes arithmétiques des variables de qualité de l'eau en fonction de la saison d'échantillonnage, de la classe de régime hydrique et de la position amont vs aval du lit de laitiers sidérurgiques.

Saison	Classes		PH	MES	P part	P dissous	P ortho	P bio
	Regime <sup>1</sup>	Position						
Automne 2006	Bas	Aval	7,9	306	455	97	70	252
		Amont	7,4	401	541	92	65	253
	Haut	Aval	7,9	721	798	118	86	366
		Amont	7,3	757	838	86	58	358
Automne 2007	Bas	Aval	,	213	246	95	65	196
		Amont	,	418	468	71	42	268
	Haut	Aval	7,3	226	328	142	119	265
		Amont	7,1	228	331	120	98	244
Printemps 2007	Bas	Aval	7,7	276	300	102	75	200
		Amont	6,5	285	313	71	48	198
	Haut	Aval	7,3	438	537	99	62	265
		Amont	7,0	414	513	87	52	255
Printemps 2008	Bas	Aval	7,7	410	476	150	116	321
		Amont	7,3	508	567	156	111	360
	Haut	Aval	7,2	656	776	121	90	399
		Amont	7,1	650	701	78	41	317

1: Bas: < 5 mm/jr; Haut: > 5 mm/jr



**Figure 9. Paires d’observations du pH (a), des concentrations de matières en suspension (b) et des concentrations en phosphore total (c) associées aux échantillons prélevés en amont et en aval du lit de laitiers sidérurgiques pour les trois sites expérimentaux.**

## 2.2 Ph

Le pH du ruissellement de surface a été significativement affecté par les structures de captage ( $p < 0,001$ ; tableau 2). Ces augmentations sont particulièrement mises en évidence en figure 9, qui illustre les pH des paires d’échantillons prélevés de façon synchrone en amont et en aval des lits de laitiers. Les moyennes ajustées au modèle de variance (Tableau 3) font état d’un pH initial du ruissellement de surface de l’ordre de 7,12 pour l’ensemble des sites et des campagnes d’échantillonnage. Suivant le passage dans les lits de laitiers, le pH du ruissellement grimpe en moyenne à 7,53. L’analyse de variance détecte par ailleurs un effet significatif de la saison d’échantillonnage sur le pH du ruissellement aux exutoires des structures de captage (tableau 2). Les moyennes de pH ajustées au modèle de variance tendent à décroître après la première saison d’échantillonnage. De 7,9 à l’automne 2006, le pH moyen du ruissellement à l’exutoire des lits de laitiers se situe entre 7,2 et 7,7 au printemps 2008 (Tableau 1).

Les augmentations modérées du pH du ruissellement dans le cadre de la présente étude traduisent les fortes teneurs en chaux libre des laitiers sidérurgiques provenant de la compagnie MultiServ Harsco utilisés dans le banc d'essai (27,7 g/g CaO; Chazarenc et col., 2007). Les pH observés aux exutoires des lits de laitiers demeurent cependant largement en deçà de ceux rapportés dans des essais en laboratoire réalisés avec le même matériel (Anjab et col., 2009; Chazarenc et col., 2007). Plusieurs facteurs ont contribué à limiter les augmentations de pH dans le cadre de la présente étude, dont un temps de contact relativement court (moyenne estimée de 3,4 heures), un facteur de dilution élevé (associé aux importants volumes de ruissellement) de même que la granulométrie grossière du matériel (10-20 mm).

Lors de la conception de la présente étude, la hausse du pH et la cimentation du matériel constituaient les principales préoccupations quant à l'innocuité environnementale des laitiers et la faisabilité du dispositif expérimental. La cimentation intervient en présence de conditions d'écoulement non saturé, favorisant la réaction du CO<sub>2</sub> avec le calcium présent dans les laitiers et ainsi former du CaCO<sub>3</sub>. Aussi, une granulométrie grossière a été retenue (10-30 mm) afin de se soustraire aux hausses importantes de pH et minimiser les risques de prise en masse du matériel.

Au cours de la période d'étude, une seule observation de pH (1% de l'ensemble des observations en aval des lits de laitiers) a dépassé le critère de rejet pour l'écosystème aquatique de 9,5 établie par le MDDEP. Le pH de 9,73 a été observé au site A, le 31 mars 2007, soit au cours des premiers épisodes de ruissellement nival suivant l'implantation des structures de captage en 2006 (figure 7). Le taux de ruissellement de surface journalier mesuré au ruisseau Au Castor était alors de 2,4 mm, ce qui permet d'estimer un temps de contact du ruissellement avec les laitiers de l'ordre de cinq heures.

Au plan opérationnel, le maintien du pH sous le seuil environnemental de 9,5 observé dans le cadre de la présente étude témoigne de la faisabilité de recourir aux laitiers sidérurgiques de la compagnie MultiServ Harsco dans le cadre d'aménagements en milieu naturel, sans encourir de risque au plan de la réaction (pH) du ruissellement de surface. Il n'est cependant pas exclu que le recours à une granulométrie plus fine du matériel de même qu'à un temps de contact plus long puisse se traduire en un pH de l'effluent plus élevé. Dans la perspective où ces avenues seraient considérées, afin d'optimiser le captage du P soluble, il serait opportun de considérer le mélange des laitiers avec d'autres matériaux. Chazarenc et col.(2008b) ont ainsi démontré que le mélange des laitiers de MultiServ Harsco avec des graviers d'apatite et de calcaire permettaient de limiter les augmentations de pH sous la barre de à 8.0 en essais en laboratoire.

**Tableau 2. Valeurs F et probabilités associées aux effets et interactions des laitiers sidérurgiques (POSITION) et du temps (SAISON) dans le modèle d'analyse de variance appliqué aux observations de qualité de l'eau.**

VARIABLE		SAISON	POSITION	SAISON* POSITION
Ph	Valeur F	6.80	16.38	1.62
	Pr > F	0.0005	0.0001	0.1944
MES	Valeur F	3.50	1.88	0.49
	Pr > F	0.0188	0.1733	0.6870
P part	Valeur F	3.02	1.08	0.54
	Pr > F	0.0338	0.3008	0.6537
P dissous	Valeur F	1.49	16.14	0.26
	Pr > F	0.2229	0.0001	0.8527
P ortho	Valeur F	2.75	23.21	0.13
	Pr > F	0.0475	<.0001	0.9421
P bio	Valeur F	1.98	0.27	0.10
	Pr > F	0.1225	0.6013	0.9583

**Tableau 3. Moyennes ajustées au modèle de variance des variables de qualité de l'eau en fonction de la position amont vs aval du lit de laitiers sidérurgiques et de la saison d'échantillonnage.**

	Position <sup>1</sup>		SAISON <sup>1</sup>			
	Amont (Ruissellement)	Aval (Drain)	AUTOMNE 2006	PRINTEMPS 2007	ÉTÉ/AUT 2007	PRINTEMPS 2008
pH	7,12	7,53	7,64	7,13	7,21	7,32
MES (mg/l)	307	282	366	257	196	407
P part (ug/l)	396	370	483	315	283	498
P dissous (ug/l)	85	102	91	81	100	100
P ortho (ug/l)	53	70	64	49	72	61
P bio (ug/l)	240	246	258	208	221	292

1: Les moyennes ajustées au modèle en caractères gras et encadrées témoignent de facteurs POSITION et/ou SAISON significatifs. Les valeurs présentées sont des transformations des moyennes du modèle exprimées originalement en log naturel.

### 2.3 Matières en suspension

L'analyse de variance des observations de concentration de matières en suspension indique que les lits de laitiers n'ont eu aucun effet significatif sur ce paramètre de qualité de l'eau (Tableau 2). La figure 9 b illustre la variabilité des observations de MES dans le ruissellement, précédent et suivant son passage au travers des lits de scories. Malgré une forte variabilité des concentrations de MES à l'entrée des structures de captage, avec des maxima atteignant 1,600 mg MES/l, les lits de scories n'ont eu qu'un effet marginal sur la rétention de sédiments. La concentration moyenne en MES ajustée au modèle de variance (trois sites) passe de 307 mg MES/l à l'entrée des structures, à 282 mg MES/l à leur exutoire (Tableau 3). Cette différence n'est pas statistiquement significative. L'effet significatif de la saison d'échantillonnage témoigne pour sa part de la variabilité dans les conditions hydrologiques à l'œuvre au cours de l'étude, alors que l'automne 2006 et le printemps 2008 ont été particulièrement fertiles en ruissellement de haute intensité.

Des concentrations en MES du ruissellement relativement peu affectées par le passage au travers des lits de laitiers est souhaitable au plan opérationnel. Rappelons que le but des lits de laitiers sidérurgiques est de retenir les fractions solubles de P présent dans le ruissellement. Cette rétention des fractions solubles se veut complémentaire à celle des fractions particulières, résultant des processus hydrauliques de laminage des pointes de ruissellement de surface et de sédimentation provoqué en amont des structures de captage. Une rétention importante de sédiments dans les lits de laitiers est de nature à bloquer leur action en colmatant leur surface de contact. Aussi, dans la plupart des ouvrages en milieu naturel faisant intervenir des laitiers, des dispositifs de sédimentation sont généralement installés en amont des matériaux propres à retenir les fractions solubles de P. Dans le présent dispositif à l'étude, une granulométrie grossière (10-30 mm) des laitiers a été sélectionnée afin de se soustraire au problème de colmatage du lit. Les observations de concentration de MES en amont et en aval des lits de laitiers témoignent en définitive d'un effet marginal du dispositif sur la rétention de sédiments. Une implication pratique de ces résultats, dans la perspective d'utiliser ces laitiers dans le cadre d'autres aménagements en milieu naturel, est la justification du recours à une granulométrie grossière afin de prévenir à long terme le colmatage de la structure de captage.

### 2.4 Phosphore

La comparaison des observations de concentration en phosphore en amont et en aval des lits de laitiers aux trois sites expérimentaux témoignent d'une efficacité nulle des structures de captage à retenir du phosphore, tant sous la forme dissoute que particulière (figure 9). Cette absence d'effet des structures de captage sur la rétention de P est observée pour l'ensemble des quatre saisons d'échantillonnage, quelque soit les hauteurs quotidiennes de ruissellement ou les concentrations de P à l'entrée. La concentration en P total du ruissellement en aval des lits de laitiers se situent entre 91 et 1734 ug P/l et reflètent essentiellement les concentrations observées dans les fossés, en amont des

structures de captage. Le ruissellement en aval des structures de captage conserve une forte proportion de P particulaire, similaire à celles observées aux fossés, de l'ordre de 69 à 80 % du P total selon le site d'étude. La biodisponibilité de ce phosphore lié aux sédiments en suspension dans le ruissellement demeure relativement faible et similaire pour les trois champs à l'étude, soit de l'ordre de 32 à 34% du P particulaire. Il en résulte que les exportations observées de P vers le cours d'eau ont en moyenne un indice de biodisponibilité globale variant de 46 à 53% selon le site d'étude. Ainsi, environ la moitié du P exporté vers le ruisseau demeure fortement associé aux sédiments et n'est pas susceptible d'affecter l'écosystème aquatique. Rappelons qu'au plan opérationnel, les lits de laitiers ne sont pas destinés à retenir ces formes particulières et non biodisponibles de P, mais plutôt les formes solubles et réactives de P, susceptibles d'avoir un impact adverse sur le milieu aquatique. Il est cependant constaté que les dispositifs expérimentaux à l'étude n'ont cependant eu aucun impact sur la rétention de ces formes dissoutes de P. Les moyennes ajustées au modèle de variance témoignent plutôt d'augmentations significatives en P dissous et en orthophosphates ( $p < 0.001$  ; Tableau 2). La concentration moyenne en P dissous passe ainsi de 85 à 102 ug P/l, respectivement, de l'amont vers l'aval des lits de laitiers, soit une augmentation de 20%. Cette augmentation de la fraction soluble de P témoigne possiblement d'une réorganisation du P particulaire stocké dans le lit de laitiers au cours de la période d'étude. Une diminution des concentrations en P particulaire, qui passe de 396 à 370 ug P/l suivant le passage du ruissellement au travers des lits de laitiers, bien que non significative (Tableau 2), suggère cette hypothèse. En définitive, la concentration en P biodisponible demeure le meilleur indicateur de la performance des structures de captage, en combinant les formes réactives particulières et solubles de P. Une différence non significative des moyennes ajustées au modèle de variance entre l'amont (240 ug P/l) et l'aval des laitiers (240 ug P/l) permet de conclure à un effet global nul des lits de laitiers sur la rétention de formes réactives de P (Tableau 3).

Plusieurs facteurs ont possiblement contribué à limiter la capacité de rétention du P par les lits de laitiers sidérurgiques dans le cadre du dispositif à l'étude. Il est estimé que la concentration initiale en P dissous du ruissellement et le temps de rétention/réaction dans le système ont joué des rôles prépondérants. Rappelons que la littérature scientifique portant sur des essais avec des concentrations en P dissous de l'ordre de ceux observés dans la présente étude (maximum de 400 ug P/l ; moyenne de 85 ug P/l; Tableaux 2 et 3) est à toutes fins pratiques inexistante. Typiquement, les résultats d'essais en laboratoire et en milieu naturel concernent des affluents caractérisés par des concentrations supérieures à 20 mg P/l.

Deux processus distincts sont à la base de la rétention du phosphore dans le type de matériel utilisé, soit l'adsorption sur les sites de fixation des laitiers, principalement liés au fer et à l'aluminium, de même que la précipitation du P avec le calcium. Les processus d'adsorption sont relativement rapides et redevables à la teneur du matériel en minerais. Les laitiers provenant de fours à arc électrique (FAE) sont généralement produits à partir de matériaux recyclés, qui contiennent une part importante de minerais à potentiel élevé d'adsorption. Dans le cas de la présente étude, le matériel utilisé est composé à parts égales de minerai de fer purifié (iron ore) et de matériaux recyclés, ce

qui confère aux laitiers produits un potentiel d'adsorption inférieur aux laitiers FAE classiques. Le potentiel de rétention du P des laitiers utilisés dans le cadre de la présente étude est donc plutôt associé à la libération lente de calcium et d'hydroxides, résultant en la formation d'hydroxyapatite. Les laitiers sidérurgiques provenant des fours à arc électrique de la compagnie MultiServ Harsco à Contre-Cœur sont caractérisés par une forte teneur en chaux libre, d'où un potentiel très élevé de précipitation du phosphore. La réaction requiert cependant un temps de contact plus long que pour le processus d'adsorption. Une période de 24 heures est généralement ciblée dans les essais en laboratoire et en milieu naturel.

Dans le cadre de la présente étude, le temps de rétention a considérablement varié, reflétant des conditions hydrologiques fort contrastées (ruissellement journalier compris entre 1 et 23 mm/jr). Le temps moyen de rétention, estimé à 3,4 heures, ne semble manifestement pas suffisant pour assurer une complexation significative du P dissous dans le ruissellement avec les laitiers. Lors de la conception du projet, des réductions tangibles de P étaient anticipées lors des périodes de rétention hydraulique les plus longues et associées aux événements de ruissellement de surface les moins intenses. Cette hypothèse ne s'est cependant pas confirmée. En effet, même en considérant les campagnes d'échantillonnage associées aux périodes de détention les plus longues (15 heures, associé un volume journalier de ruissellement de 16 m<sup>3</sup>, ou 0,8 mm/jr), aucune réduction des concentrations en P dissous n'est observée aux exutoires des trois structures de captage. Il est ainsi estimé que la concentration en P de l'affluent demeure le principal facteur limitant de l'efficacité des lits de laitiers sidérurgiques dans le cadre de la présente étude. Des expérimentations récentes portant sur les mêmes laitiers sidérurgiques de fours à arc électrique que ceux utilisés dans la présente étude (Anjab et col., 2009) suggèrent la concentration minimale en P dissous de l'affluent autour de 20 mg P/L, afin d'obtenir une rétention tangible du P. Un tel niveau de concentration-cible en P dissous exclut définitivement le recours à ces matériaux dans la réduction du P réactif du ruissellement de surface de champs agricoles, dont les concentrations observées les plus élevées sont au moins dix fois inférieures au seuil de 20 mg P/l (Michaud et col., 2009).

Si les résultats de la présente étude sont de nature à proscrire le recours aux laitiers FAE dans le contrôle des sources diffuses de P provenant des champs agricoles, ils n'en limitent pas moins le potentiel de ces matériaux dans le contrôle de sources ponctuelles présentant des concentrations d'affluent plus élevées en P. Rappelons que les laitiers FAE de MultiServ Harsco possèdent un potentiel de saturation en P très élevé, de l'ordre de 2 g/kg, largement supérieur à ceux d'autres laitiers FAE rapportés dans la littérature (Vohla et col., 2009; Chazarenc et col., 2008). Ils disposent donc d'un potentiel très intéressant en matière de rétention de P pour des charges élevées de l'ordre de 100-500 mg P/L provenant par exemple de dalles de cours d'exercice, des parcs d'engraissement, ou de système de traitement d'engrais de ferme. Anjab et col. (2009) ont en effet documenté récemment en laboratoire des réductions de l'ordre de 95% du P présent dans un affluent présentant une concentration initiale de 26 mg P/l, une granulométrie des laitiers comprise entre 10 et 20 mm et un temps de rétention théorique de 36 heures. Un pH de l'effluent voisinant la valeur de 11 poserait cependant un problème en milieu naturel. Des suivis subséquents rapportaient des taux de rétention de 70% du P d'un

affluent caractérisé par une concentration initiale de 130 mg P/l, et résultant en un pH de 9,5, compatible avec le critère de rejet du MDDEP. Ces observations témoignent ainsi de la faisabilité du recours aux laitiers sidérurgiques en milieu naturel, qui concilient la rétention du P avec une qualité du lixiviat acceptable au plan environnemental.

### **3 DIFUSION DES RÉSULTATS**

Compte tenu de ses résultats mitigés, cette étude n'a pas profité d'activités de diffusion auprès des intervenants du secteur agricole. A la lumière des premiers résultats, les partenaires du projet ont été avisés des limites à l'application de ces dispositifs pour le contrôle des sources diffuses de phosphore. Les laitiers sidérurgiques n'ont donc pas été mis à contribution dans la confection d'ouvrages hydro-agricoles par la Coopérative de solidarité du bassin versant de la Rivière aux Brochets, principal partenaire de réalisation du projet. Le présent rapport est disponible sur les sites internet de l'IRDA et de l'AGRIRÉSEAU.

### **4 HISTOIRE D'UNE RÉUSSITE**

Les résultats de la présente étude à l'égard de la rétention du phosphore du ruissellement de surface par les laitiers sidérurgiques ne sont pas concluants. Le recours aux laitiers sidérurgiques provenant des fours à arc électrique n'est donc pas recommandé pour le contrôle des sources diffuses de P provenant de champs agricoles. Le principal handicap à l'efficacité des laitiers est la concentration relativement faible du P soluble du ruissellement de surface, qui demeure largement inférieure aux seuils minima de concentration propres à une rétention du P par les laitiers sidérurgiques à l'étude.

En contrepartie, la présente étude a démontré l'innocuité environnementale des laitiers sidérurgiques des fourneaux à arc électrique dans des aménagements en milieu naturel. D'une part, les pH observés aux exutoires des structures de captage demeurent en deçà du critère de concentration du rejet de 9,5. D'autre part, compte tenu de la granulométrie utilisée (10-30 mm), les lits de laitiers ont démontré peu de rétention de sédiments, ce qui s'avère souhaitable en vue de minimiser le colmatage des lits et la réduction subséquente de sa capacité de rétention du P. Enfin, rappelons que le dispositif s'est montré exempt de processus de cimentation, trois ans après sa mise en place. Le processus de cimentation des laitiers, observé dans le cadre d'autres dispositifs expérimentaux est généralement encouragé par des conditions d'écoulement non saturé et une granulométrie fine des laitiers. L'entrée de CO<sub>2</sub> dans le milieu favorise alors la précipitation avec le calcium en solution émanant de la chaux présente en abondance dans les lits. Dans le cas de la présente étude, la granulométrie grossière des laitiers et le design des structures de captage, favorisant l'écoulement saturé à travers les lits de laitiers, se sont montrés efficaces à prévenir ce processus.

En conclusion, retenons que les résultats de ce premier banc d'essai au Québec de laitiers sidérurgiques en contrôle de sources diffuses de P sont très clairs quant 1) à l'innocuité

environnementale des laitiers sidérurgiques des fours à arc électrique utilisés et 2) à la faisabilité d'utiliser ce matériel en milieu naturel sans compromettre la perméabilité des ouvrages. Cependant, les résultats sont aussi très clairs quant à l'inefficacité des laitiers sidérurgiques utilisés à retenir une portion significative du P soluble provenant du ruissellement diffus de champs agricoles. En vue de la littérature scientifique sur le sujet, la concentration relativement faible du ruissellement de surface en P, voisinant 1 mg P/l, demeure en deçà du seuil plancher de concentration de l'ordre de 20 mg P/l préalable à l'efficacité des laitiers. Ces résultats mitigés en matière de déphosphoration du ruissellement de surface ne mettent cependant pas en cause l'intérêt de ces matériaux pour la rétention de P soluble dans le cadre d'autres applications, notamment dans le contrôle de sources ponctuelles plus chargées en phosphore. Rappelons que le potentiel de rétention du P du matériel utilisé dans le cadre de la présente étude demeure environ dix fois plus élevé que les laitiers FAE rapportés dans la littérature (2 g P/kg ; Charenzenc, 2008a) et que son efficacité a été démontré au plan opérationnel en pisciculture (Comeau, 2004), aux bassins du Biôdome de Montréal et à l'exutoire de marais filtrants (Drizo, 2002). Aussi, ces laitiers conservent un important potentiel d'application en matière agroenvironnementale. Le traitement des effluents d'élevage et le contrôle de lixiviats chargés en P (cours d'exercice, parc d'engraissement, marais filtrant, entreposage d'ensilage, etc) constituent autant d'opportunités où les laitiers sidérurgiques pourraient jouer un rôle complémentaire, voire de premier plan, dans la déphosphoration des écoulements. En ce qui a trait à d'éventuelles applications en milieu naturel, les résultats de la présente étude permettent de proposer quelques balises, notamment :

- une concentration du lixiviat en P dissous au-dessus de 20 mg P/l ;
- une granulométrie des laitiers dépassant le seuil minimal de 10 mm ;
- un design du système assurant un écoulement saturé à travers le lit de laitiers ;
- un temps de réaction minimal de 12 heures, préférablement 24 heures, estimé sur la base du volume des vides par rapport au volume de l'effluent (par exemple, un volume d'effluent journalier de 10 m<sup>3</sup>/jr requière 20 m<sup>3</sup> de matériel à une porosité de 50% pour une rétention de 24 heures);
- un dispositif favorisant la sédimentation précédant l'entrée d'effluents chargée en MES dans le lit de laitiers.

Bien que non concluants au plan de la rétention du phosphore de sources diffuses, la présente étude milite néanmoins pour la conduite de projets pilotes mettant en valeur le potentiel de rétention du P des laitiers sidérurgiques dans le contrôle des sources ponctuelles de P en milieu naturel. Les observations de la qualité des effluents aux exutoires des trois dispositifs à l'étude témoignent en effet de l'innocuité environnementale du matériel, qui pavent la voie à de nombreuses applications en milieu agricole.

## 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 CITÉES

Beaudin, I., J. Deslandes, A. R. Michaud et G. Lévesque. 2004. Application of SWAT to the Pike-River watershed for diffuse phosphorus transport. 57e Congrès annuel de l'ACRH. Montréal, juin, 8 p.

Anjab, Z.A., F. Chazarenc et Y. Comeau. 2009. Phosphorus removal from wastewater using slag filters: Effect of slag particle size on treatment. Elsevier Editorial System(tm) for Water Research. Soumis.

Baker, M.J., Blowes, D.W. and Ptacek, C.J. (1998). Laboratory development of permeable reactive mixtures for the removal of phosphorus from onsite wastewater disposal Systems. Environ. Sci. Technol., 32, 2308-2316.

Blais, S. 2002. Les cyanobactéries en 2000 et en 2001 dans la portion québécoise de la baie Missisquoi: impacts anthropiques et étude in situ. Dans « Le Lac Champlain, à l'aube du nouveau millénaire », Lake Champlain Research Consortium, 59 p

Comeau, Y. 2004. Traitements des effluents piscicoles par marais filtrants et support absorbant. Colloque aquaculture et développement durable. 72e Congrès de l'ACAFAS.

Crolla, A. 2006. Traitement des eaux In situ. Collège d'Alfred de l'Université de Guelph. [www.orwc.uoguelph.ca](http://www.orwc.uoguelph.ca)

Chazarenc, F., J. Brisson et Y. Comeau. 2007. Slag columns for upgrading phosphorus removal from constructed wetland effluents. Water Science & Technology 56:3 pp 109–115.

Chazarenc, F., Kacem, M., Gerente, C., Andres, Y. 2008a. 'Active' filters: a mini-review on the use of industrial by-products for upgrading phosphorus removal from treatment wetlands. Proceedings of the 11th Int. Conf. on Wetland Systems for Water Pollution Control, International Water Association. Indore, India, Nov. 1-7.

Chazarenc, F., M. Filiatrault, J. Brisson et Y. Comeau. 2008b. Combination of slag, limestone and sedimentary apatite in columns for upgrading phosphorus removal from constructed wetland effluents. Proceedings of the 11th Int. Conf. on Wetland Systems for Water Pollution Control, International Water Association. Indore, India, Nov. 1-7.

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.

Drizo, A., Forget, C., Chapuis, R.P. and Comeau, Y. (2000). How realistic are the linear Langmuir predictions of phosphate retention by adsorbing materials? Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Congress of the International Water Association, Paris, July 2000.

Drizo A., C., Y., Forget, F., & Chapuis, R. (2002). Phosphorus Saturation Potential: A Parameter for Estimating the Longevity of Constructed Wetland Systems. *Environmental Science Technology* 36: 4642-4648.

Drizo, A., Forget, C., Chapuis, R.P. and Comeau, Y. (2006). Phosphorus removal by electric arc furnace (EAF) steel slag and serpentinite. *Water Research* 40: 113-118.

Forget, C. (2001). Élimination du phosphore dissous des effluents piscicoles à l'aide de matériaux granulaires réactifs. M.Sc.A. Thesis, Ecole Polytechnique of Montreal, Canada.

Johansson, L. (1999). Blast furnace slag as phosphorus sorbents – Column studies. *Sci. Total Environ.*, 229, 89-97.

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*. Published by ASAS –St. Joseph, MI, USA.

Hegman, W., D. Wang, and C. Borer. 1999. Estimation of Lake Champlain Basinwide Nonpoint Source Phosphorus Export. Technical Report No. 31. Lake Champlain Basin Program. Grand Isle, Vermont, 69 p.

Johansson, L. and Gustafsson, J.P. (2000). Phosphate removal using blast furnace slags and opoka-mechanisms. *Wat. Res.* 34 (1), 259-265.

Johansson Westholm, L. (2006). Substrates for phosphorus removal—Potential benefits for on-site wastewater treatment? *Water Research* 40: 23-36.

Lospied, C. (2003). Évaluation des capacités et des conditions d'enlèvement du phosphore dissous par les scories d'aciéries. M.Sc. Thesis, Ecole Polytechnique, Montreal, Canada 2003.

Mann, R.A. (1997). Phosphorus adsorption and desorption characteristics of constructed wetland gravels and steelworks by-products. *Austr. J. Soil Res.*, 35, 375-384.

Michaud, A.R. et M.R. Laverdière. 2004. Effects of cropping, soil type and manure application on phosphorus export and bioavailability. *Canadian Journal of Soil Science*, 38: 295-305.

Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2002. Description du système de transfert du phosphore dans le bassin versant du ruisseau au Castor. *Agrosol* 13(2): 124-139.

Michaud, A., J. Deslandes et J. Desjardins. 2004. Rapport final : Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles, Projet de recherche et de développement présenté au Fonds d'action québécois pour le développement durable et son partenaire financier le gouvernement du Québec (Projet no. 212), IRDA, Québec, 100 p.

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, Vol. 16, No. 1, pp. 47-59.2.2.

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., M. Giroux, C., J. Deslandes, I. Beaudin et R. Lauzier. 2009a. Prévention des transferts diffus de phosphore en bassins-versants agricoles : perspectives québécoises et de l'État du Vermont. Océanis • vol. 33-1/2 • 2007 • p. 285-320 ISSN 0182-0745 © Institut océanographique, fondation Albert Ier, prince de Monaco.

Michaud, A.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009b. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Fonds d'action québécois pour le développement durable, Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec et Programme d'aide technique de Couverture végétale du Canada. Québec, Québec, 155 p. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/204.html>

Michaud, A., J. Desjardins, M. Grenier et R. Lauzier. 2009c. Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et aux Castors – Dans le cadre du projet Lisière verte. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux brochets, AAC (PASCAA) et MAPAQ, Québec, Québec, 27 p. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/197.html>

Soulard, C (2001). Critères de sélection des scories d'aciéries pour la déphosphatation des eaux par lits filtrants. Internal Report, Ecole Polytechnique of Montreal, Montreal, Canada, 2001.

Tran, T. S., Fardeau, J.C. and Giroux, M. 1988. Effects of soil properties on plant available P determined by the isotopic dilution P-32 method. Soil Sci. Soc. Amer. J. 52: 1393-1390.

Christina, V., M. Kõiva, H.J. Bavorb, F. Chazarenc, Ü. Mander. 2009. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. Ecological Engineering. Sous presse.

Weber, D. and Drizo, A. (2005). Alternative technology for Phosphorus removal from agricultural effluents. Annual Meeting of the American Society of Agronomy (ASA)-Crop Science Society of America (CSSA)-Soil Science Society of America (SSSA) Conference proceedings. Held in Salt Lake City, Utah, USA, November 6-10.

Young et al. 1996. Evaluation and management of highway runoff water quality. Electronic courtesy of GYK & Assoc., Springfield, V.A.