

FORUM DE TRANSFERT SUR LES CYANOBACTÉRIES

Mesures précises et approches innovantes en modélisation de la dynamique des nutriments en bassin versant et plan d'eau contribuant aux fleurs des cyanobactéries

Équipe de recherche

MADRAMOOTOO, Chandra Alastair, Université McGill
Bird, David F., Université du Québec à Montréal
Michaud, Aubert, IRDA, Université de Sherbrooke
Whalen, Joann Karen, Université McGill

Partenaires



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

Développement durable,
Environnement
et Parcs

Québec 

Agriculture, Pêcheries
et Alimentation

Québec 



FORUM DE TRANSFERT SUR LES CYANOBACTÉRIES

Mesures précises et approches innovantes en modélisation de la dynamique des nutriments en bassin versant et plan d'eau contribuant aux fleurs des cyanobactéries

Étudiants

Boluwade, Alaba, PhD, McGill

Chikhaoui, Mohamed, Post doctoral, McGill

Gombault, Colline, MSc, McGill

Ngwa, Felexce, PhD, McGill

Poirier, Simon-Claude, PhD, McGill

Poon, David, MSc, McGill

Rasouli, Sogol, PhD, McGill

Mise en contexte

Les chantiers de la Recherche-action dans le bassin versant de la Baie Missisquoi, 1997-2012

Décrire



Prédire



Agir

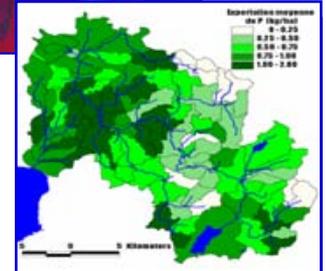
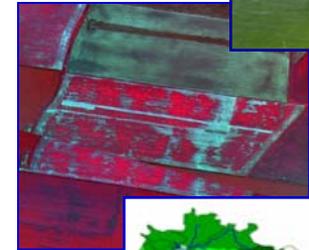


Evaluer

Monitoring des milieux terrestre et aquatique



- Outils de diagnostics à l'échelle parcellaire – Téledétection
- Outils stratégiques à l'échelle du bassin versant – Modélisation hydrologique



- Concertation des acteurs
- Complémentarité des interventions

Monitoring des milieux terrestre et aquatiques



Plan de la présentation

Les résultats du programme de recherche en partenariat sur les cyanobactéries

I. Décrire les transferts et la spéciation des nutriments

- L'influence de l'occupation du territoire
- Retracer les cheminements hydrologiques du P et du N

II. Evaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales

II. Prédire les exportations à l'échelle du bassin versant

- Modélisation hydrologique des transferts

III. Décrire la dynamique des cyanobactéries

- Monitoring et spéciation des cyanobactéries dans la baie Missisquoi

Décrire les transferts et la spéciation des nutriments L'influence de l'occupation du territoire

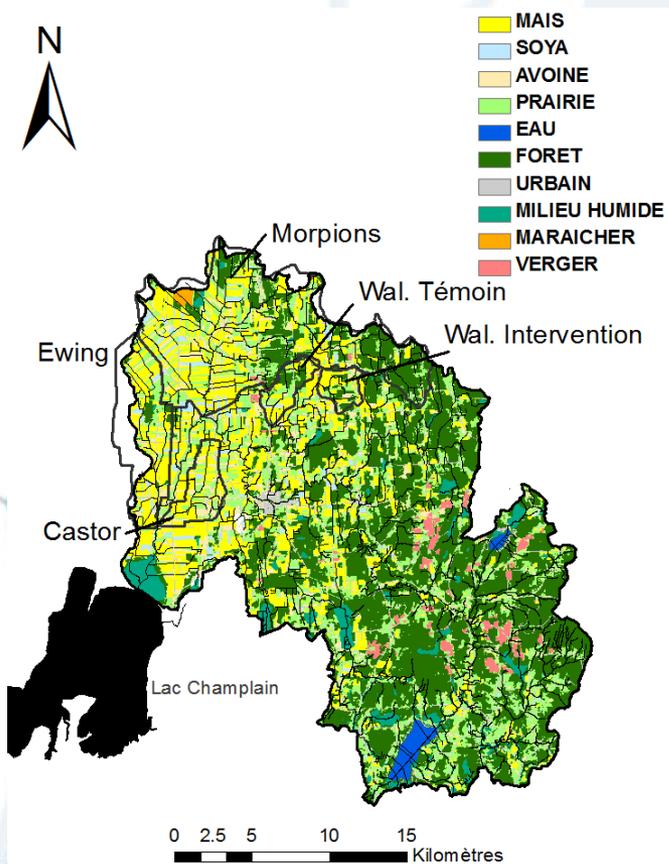
**Objectif: Déterminer les coefficients d'exportations
en fonction de l'occupation du territoire**

Approche méthodologique:

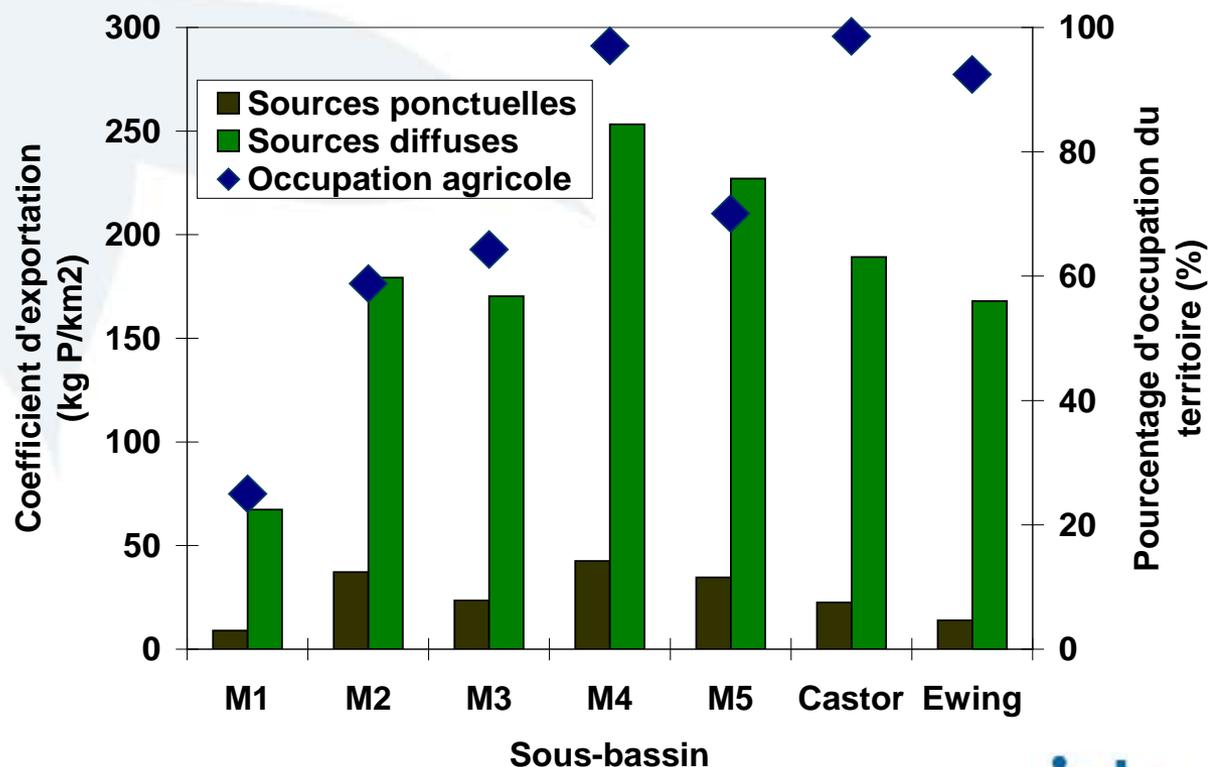
- **Échantillonnage spatial de sept sous-bassins (N=47 campagnes)**
- **Détermination des flux par la modélisation concentration:débit**
- **Séparation des flux par sources ponctuelles et diffuses de P**
- **Mise en relation des flux avec l'occupation du territoire (agricole vs urbain vs forestier) et la densité de population.**

Décrire les transferts et la spéciation des nutriments L'influence de l'occupation du territoire

Occupation du territoire Bassin Brochet



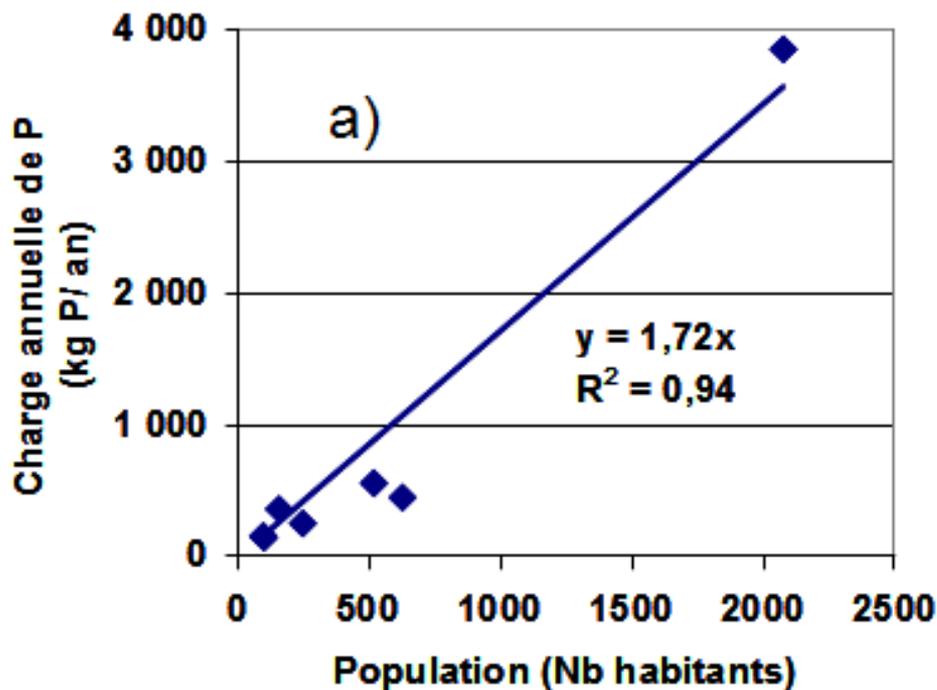
Coefficients d'exportation du P total par sous-bassin d'échantillonnage



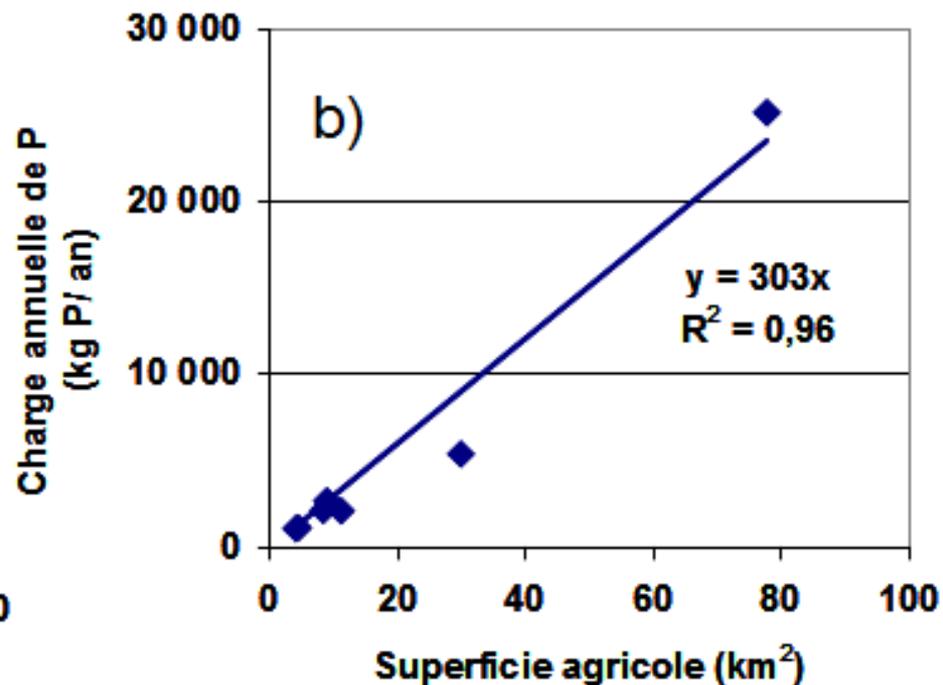
Décrire les transferts et la spéciation des nutriments L'influence de l'occupation du territoire

Charges annuelles de phosphore total

Pour la strate d'écoulement de base en fonction de la population



Pour la strate d'écoulement de crue en fonction de la superficie agricole



Décrire et Prédire les transports Retracer les chemins

Objectif: Développer de nouvelles propriétés du sols sur les chemins (souterrain) et la spéciation d

Approche méthodologique:

- Monitoring des flux et spéciation des nutriments aux échelles du paysage
- Interprétation du signal de la pollution
 - Décrire le cheminement
 - Prédire la contribution de la pollution en surface et souterrain du P à l'exposition
- Analyse de la taille et de la composition chimique de la matière organique par diffraction laser et chromatographie liquide (ré)

Bioavailable Phosphorus in Fine-Sized Sediments Transported from Agricultural Fields

Simon-C. Poirier

Dep. of Natural Resource Sciences,
Macdonald Campus of McGill Univ.,
21 111 Lakeshore Rd.,
Ste-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9
Canada
and
Institut de recherche et de
développement en agroenvironnement
2700 Erinste St.,
Québec, QC, G1P 3W8, Canada

Joann K. Whalen*

Dep. of Natural Resource Sciences,
Macdonald Campus of McGill Univ.,
21 111 Lakeshore Rd.,
Ste-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9
Canada

Aubert R. Michaud

Institut de recherche et de
développement en agroenvironnement
2700 Erinste St.,
Québec, QC, G1P 3W8, Canada

Sediments transported from agricultural fields in surface and subsurface waters contain particulate P (PP) that could be partitioned into two pools—one available for aquatic organisms including cyanobacteria, namely bioavailable particulate P (BAPP), determined by 0.1 mol L⁻¹ NaOH extraction), and the remainder not bioavailable (non-BAPP). This study aimed to quantify the PP and BAPP concentrations in surface runoff and tile drainage water from eight agricultural fields with clay and sandy soils in the Missisquoi Bay region of Quebec, Canada. Particulate P in surface and drainage water varied spatially (among fields) and temporally, with concentrations as high as 3181 µg P L⁻¹ in surface runoff and 1346 µg P L⁻¹ in tile drainage. About 30% of PP was BAPP regardless of the drainage pathway. The PP and BAPP concentrations were related linearly ($R^2 = 0.86$) to total suspended solids (TSS) in fine (0.05–1-µm) and coarse (1–100-µm) fractions. About 68% of the PP in clay soils and 50% of the PP in sandy soils were associated with the 0.05– to 1-µm size particles, which had more BAPP, on average 0.46 g P kg⁻¹, than the coarser 1– to 100-µm fraction (0.22 g P kg⁻¹). Soil parameters such as Mehlich-3 extractable (M3) P, M3Fe, and the degree of soil P saturation were related to the PP and BAPP concentrations in TSS and particle size fractions. We concluded that sediments with particle size <1 µm contained more BAPP and their loss from agricultural fields could contribute to the eutrophication downstream.

Abbreviations: ANCOVA, analysis of covariance; BAPP, bioavailable particulate phosphorus; DSFS, degree of soil phosphorus saturation; M3, Mehlich-3 extractable; MRP, molybdate-reactive phosphorus; non-BAPP, nonbioavailable particulate phosphorus; PP, particulate phosphorus; PSD, particle size distribution; soil organic matter; TSS, total suspended sediments.

Lake Champlain is a large freshwater lake (3211 km²) that spans the international boundary between Quebec, Canada, and Vermont and New York in the United States. This lake experiences episodic blooms of cyanobacteria, which increases the cost of water treatment for the surrounding municipalities that obtain their drinking water from the lake and limits recreational activities (swimming, fishing, and boating). Eutrophication of Lake Champlain is attributed to anthropogenic activities that have increased the P concentration in watersheds that drain into the lake (Seltzer and Wang, 2004). For example, nonpoint sources account for >90% of the annual P load (167 Mg P yr⁻¹) entering Missisquoi Bay in Quebec at the northern end of the lake (Hegman et al., 1999). Agricultural activities are an important source of diffuse pollution in Missisquoi Bay, contributing an estimated 39% of the annual P load (Troy et al., 2007).

Transport of P from agricultural land to surface water occurs predominantly through overland flow in many watersheds (Haygarth and Jarvis, 1999; Nash et al., 2002) and during snowmelt and soil thawing periods in Quebec (Michaud et al., 2004); however, subsurface flow through artificial tile drains was reported to account for 40% of the total P exported from agricultural fields located along the Pike River, a tributary of Missisquoi Bay (Einright and Madramootoo, 2004).

Soil Sci. Soc. Am. J. 76:259–267
Passed online 28 Oct. 2011
doi:10.2136/sssaj2010.0441

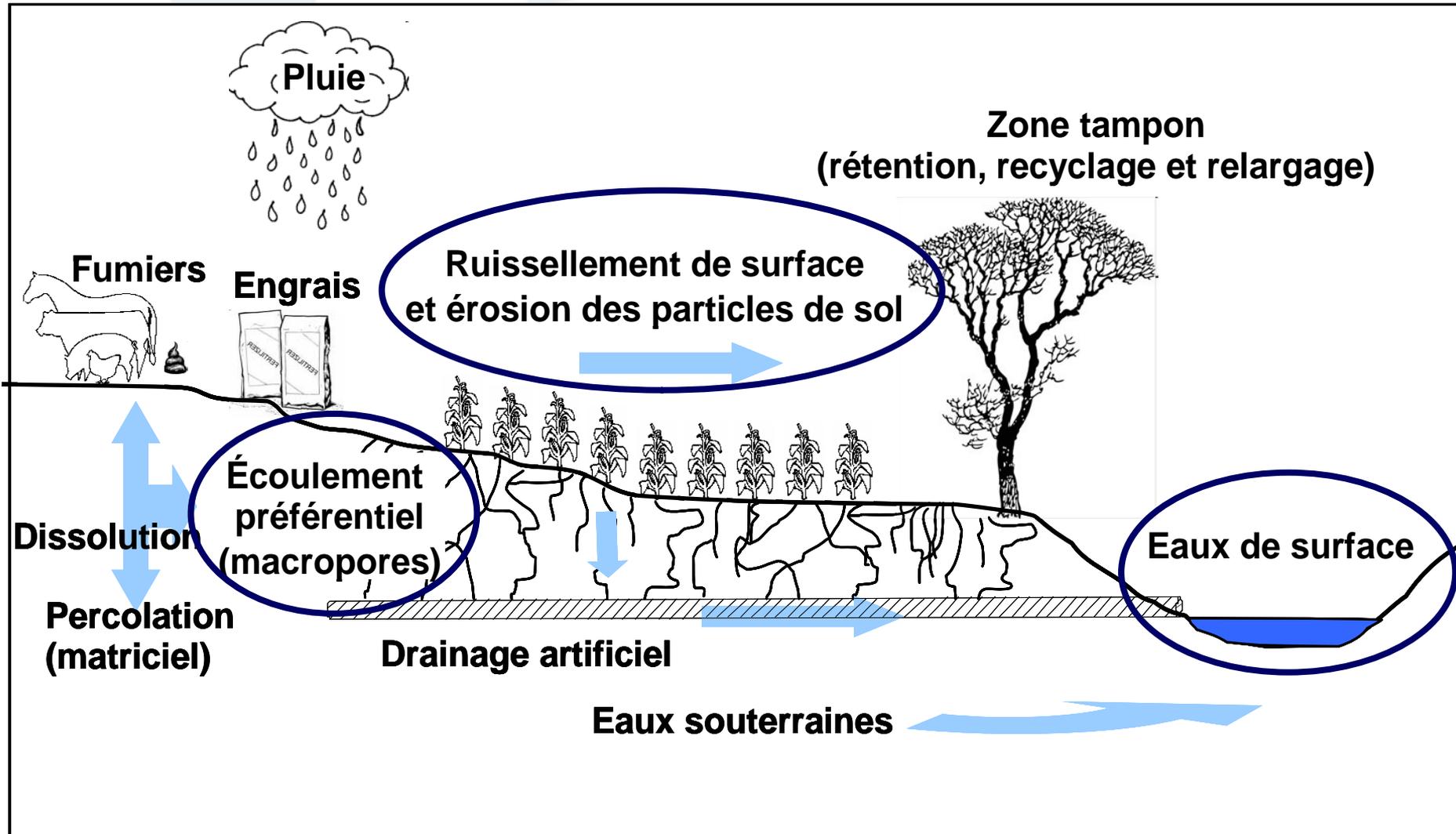
Received 2 Dec. 2010.

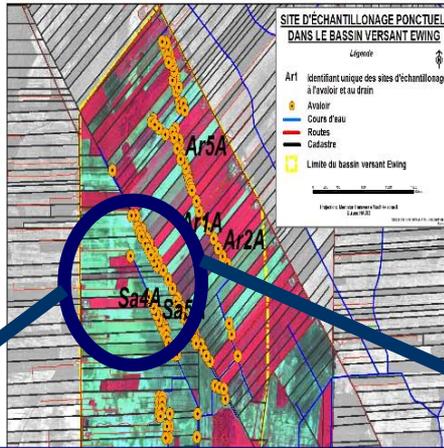
*Corresponding author (joann.whelen@mcgill.ca).

© Soil Science Society of America, 5585 Guilford Rd., Madison WI 53711 USA

All rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher. Permission for printing and for reprinting the material contained herein has been obtained by the publisher.

Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments Retracer les cheminements hydrologiques du P





Site d'échantillonnage SA4 et SA5



Photo: Richard Lauzier

Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

Retracer les cheminements hydrologiques du P

Monitoring à l'échelle parcellaire:

- 10 champs:
 - 5 loams sableux / maïs-soya
 - 3 loams argileux / maïs-soya
 - 2 loams argileux / prairies (amendés lisiers bovins)
 - 19 échantillons (drains + avaloirs)
- 21sept. 2008 – 21 mai 2009

Le projet pilote LISIÈRE VERTE de la Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets sur la rétribution des biens et services environnementaux a profité du soutien financier du programme PAASCA (AAC).

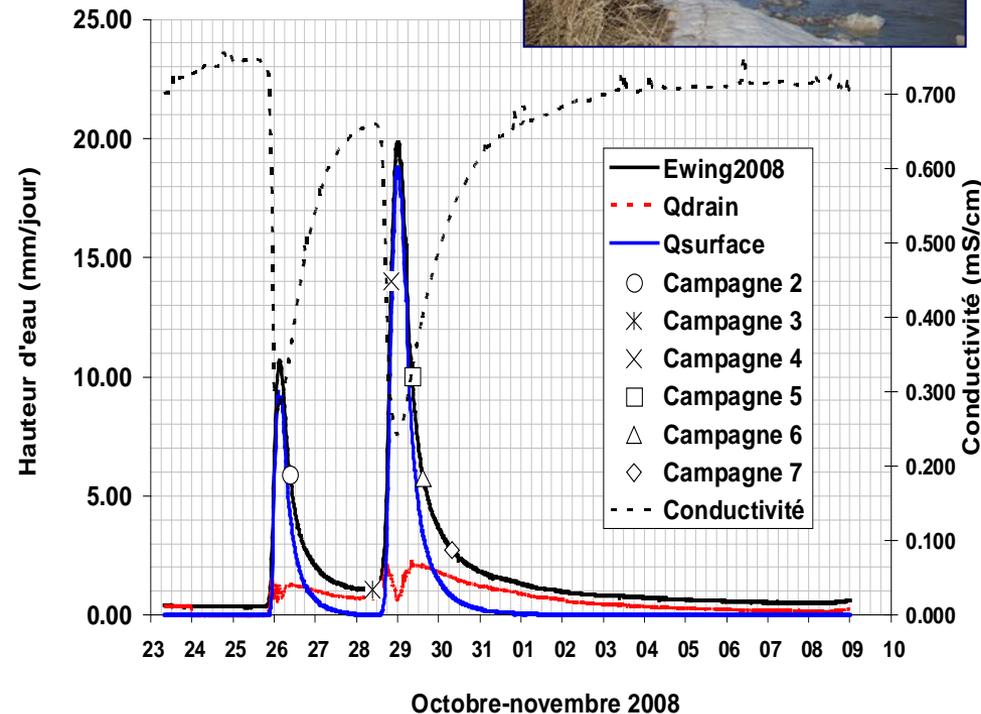
Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

Retracer les cheminements hydrologiques du P



Monitoring à l'exutoire du bassin

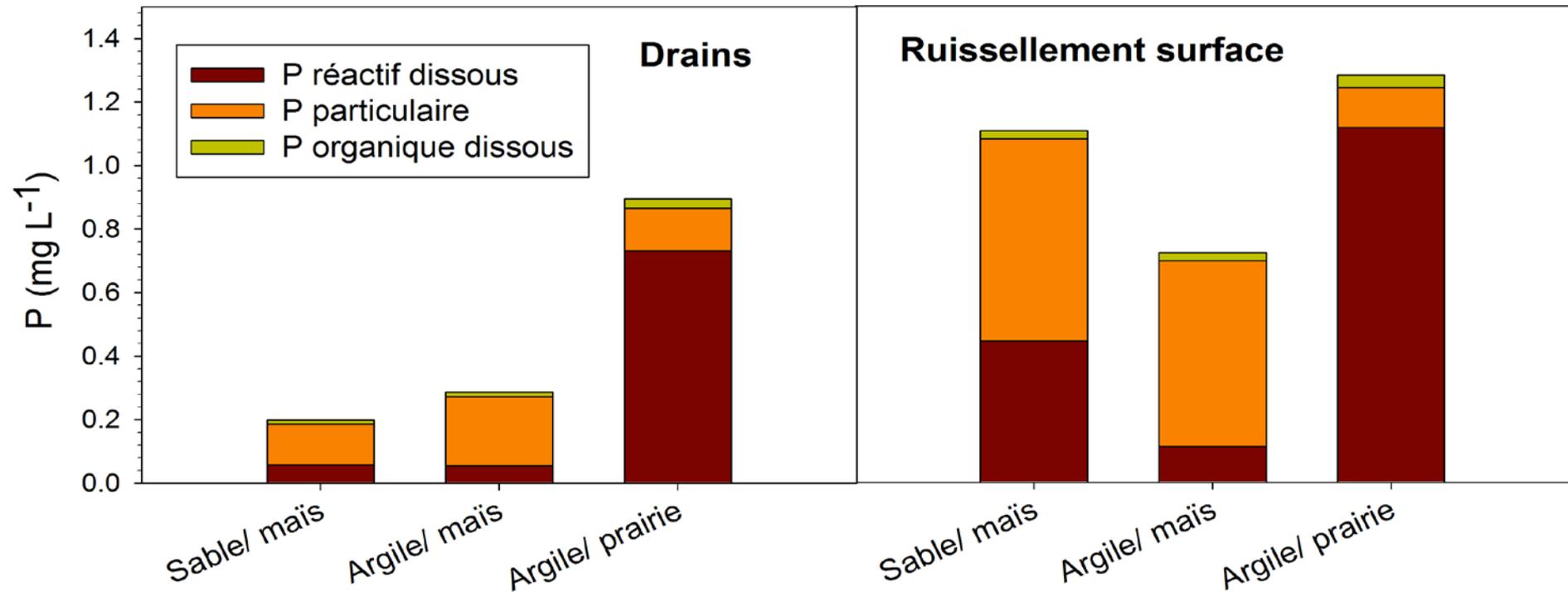
- Suivi en continu au 15 min:
 - Débit
 - Conductivité électrique
 - Turbidité
 - Température
- 72 échantillons ponctuels:
21 sept. 2008 – 21 juin 2009



Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

Retracer les cheminements hydrologiques du P

Concentrations moyennes et spéciation du P total observées au drain et dans le ruissellement de surface



P total

Effet texture: n.s.

Effet culture: $P < 0.001$

P réactif dissous

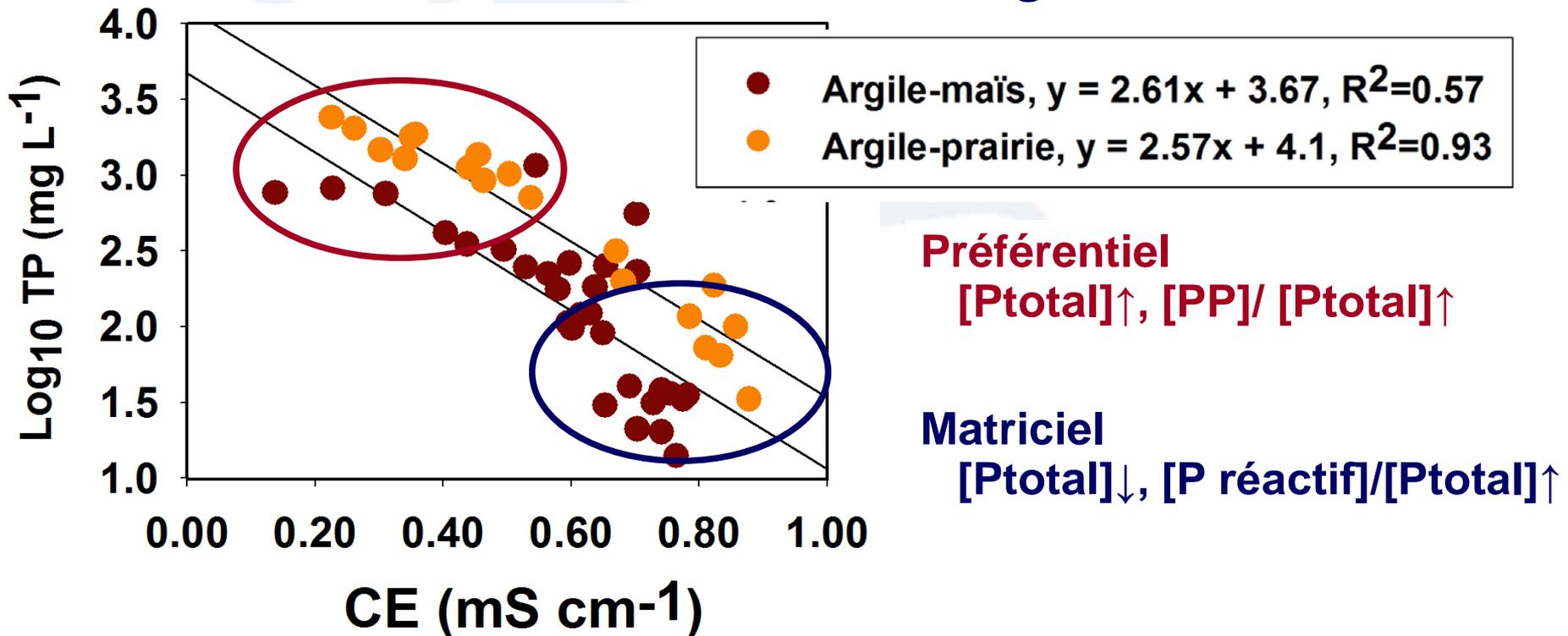
Effet texture: n.s.

Effet culture: $P < 0.001$

Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

Retracer les cheminements hydrologiques du P

La conductivité électrique: un traceur éloquent du cheminement préférentiel et de la composition du P dans les eaux de drainage

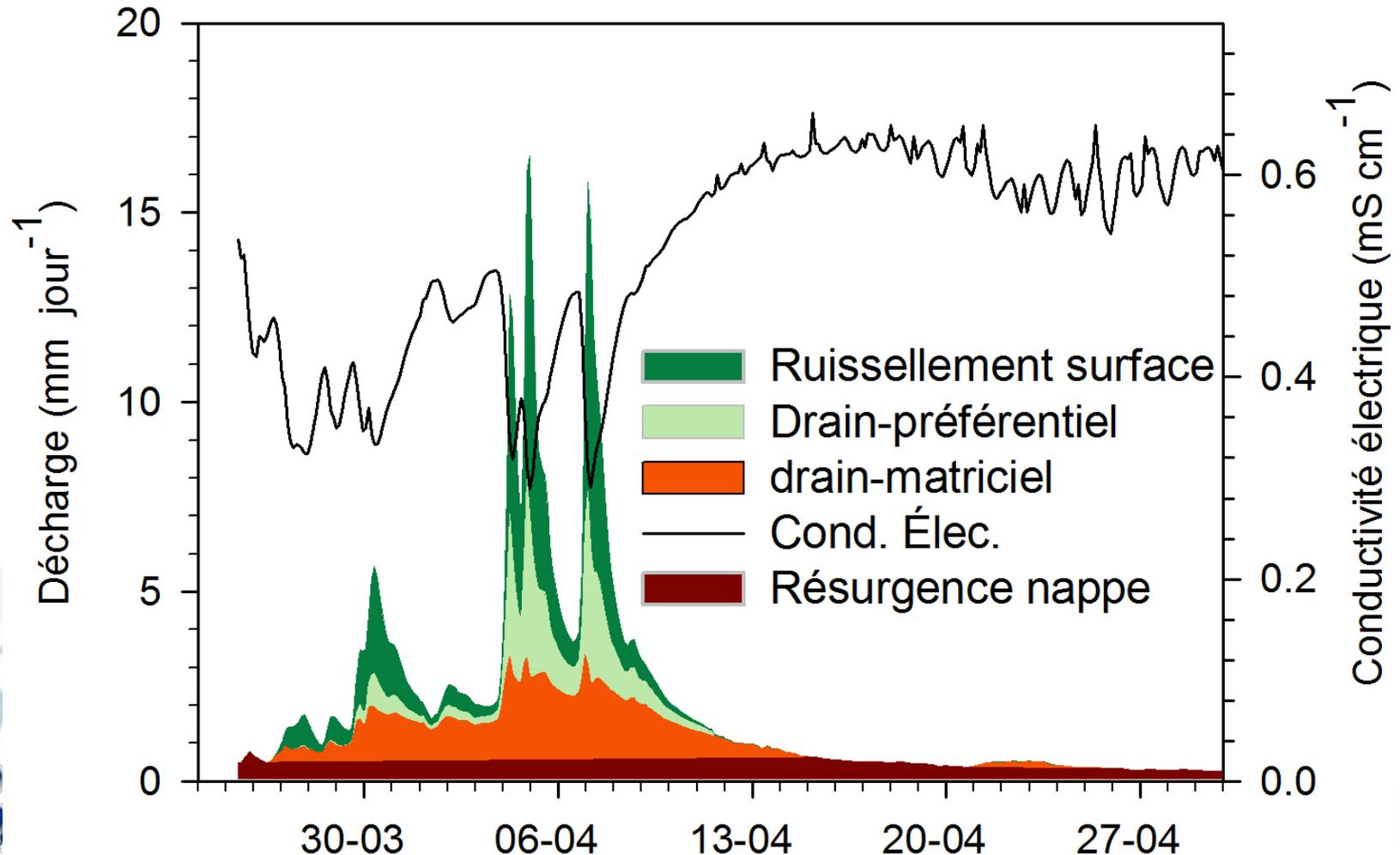


La CE moyenne des eaux du ruissellement de surface:
0.22 0.08 mS cm⁻¹.

Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

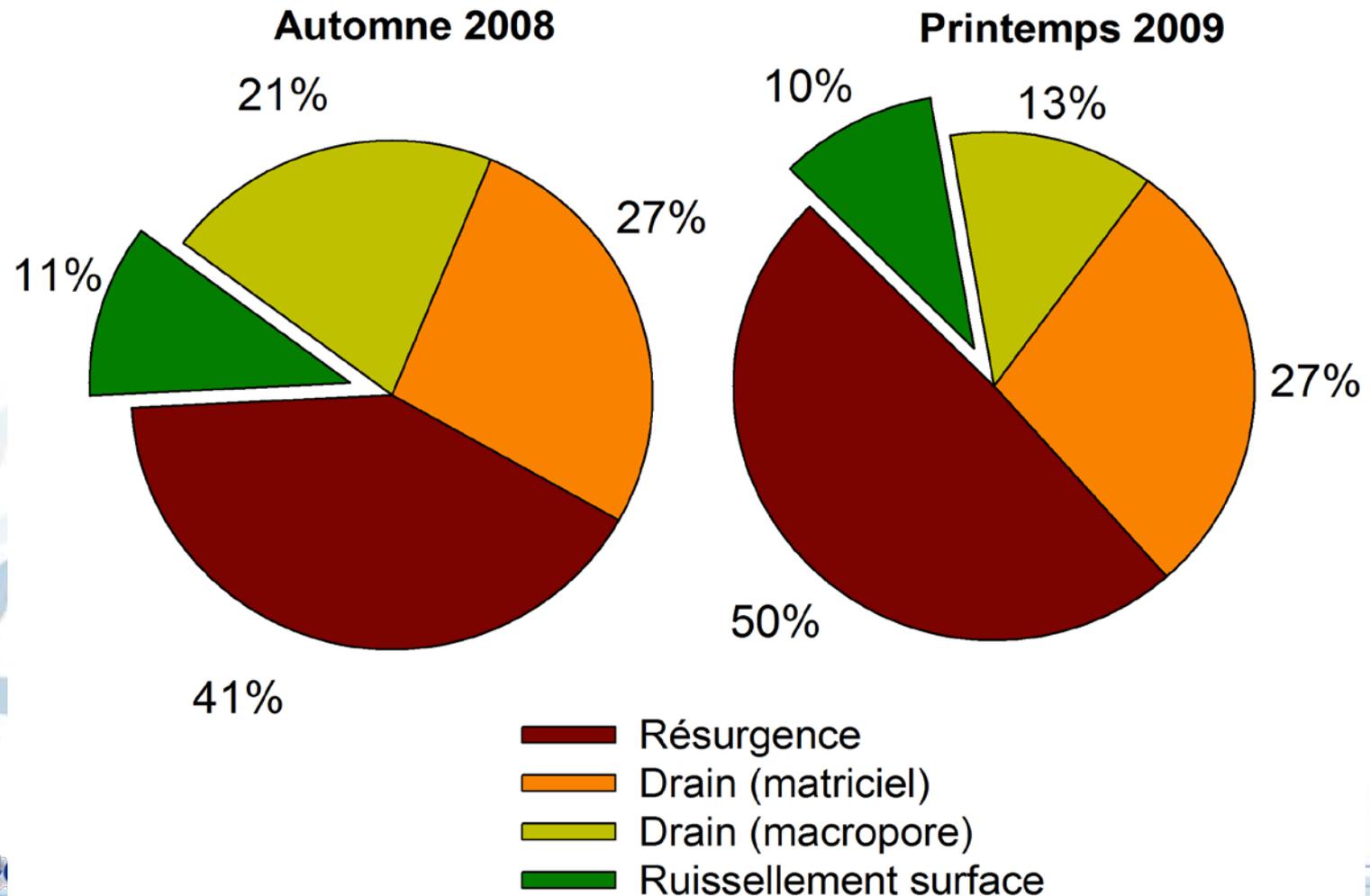
Retracer les cheminements hydrologiques du P

Séparation des hydrogrammes du ruisseau Ewing en quatre composantes

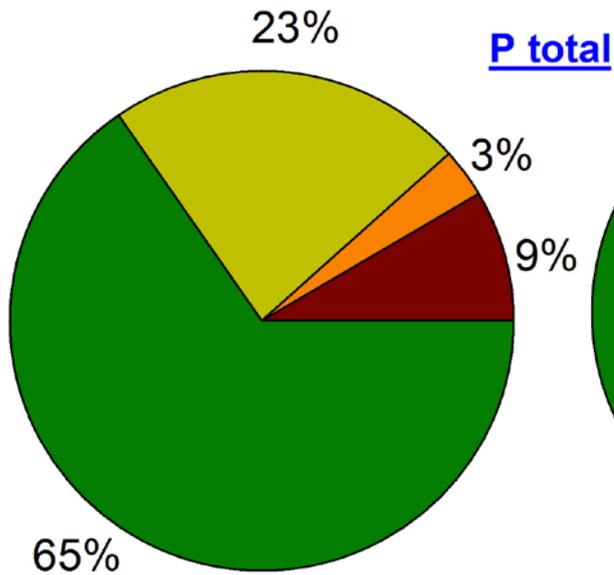


Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments
Retracer les cheminements hydrologiques du P

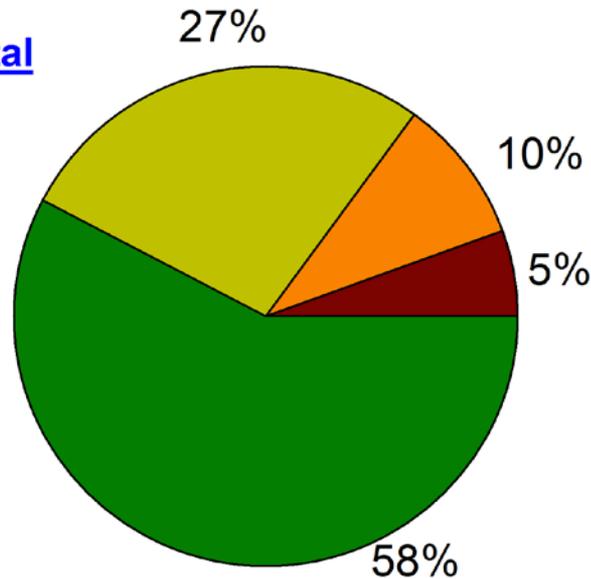
**Bilan hydrique des écoulements
du ruisseau Ewing en quatre composantes**



Automne 2008



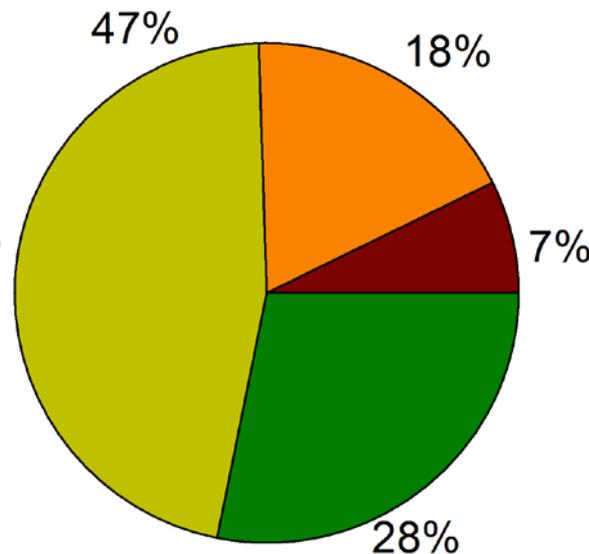
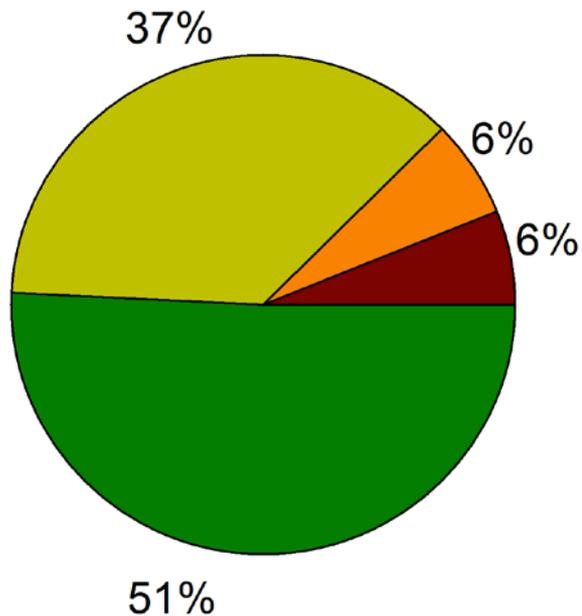
Printemps 2009



Retracer les cheminements hydrologiques du P

Bilan des charges en P des écoulements

P réactif dissous



- Résurgence
- Drain (matriciel)
- Drain (macropore)
- Ruissellement surface

Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments Retracer les cheminements hydrologiques de N

Objectif: Documenter l'effet des propriétés du sol sur les cheminements d'exportation (surface et souterrain), la spéciation et les sources de N.

Approche méthodologique:

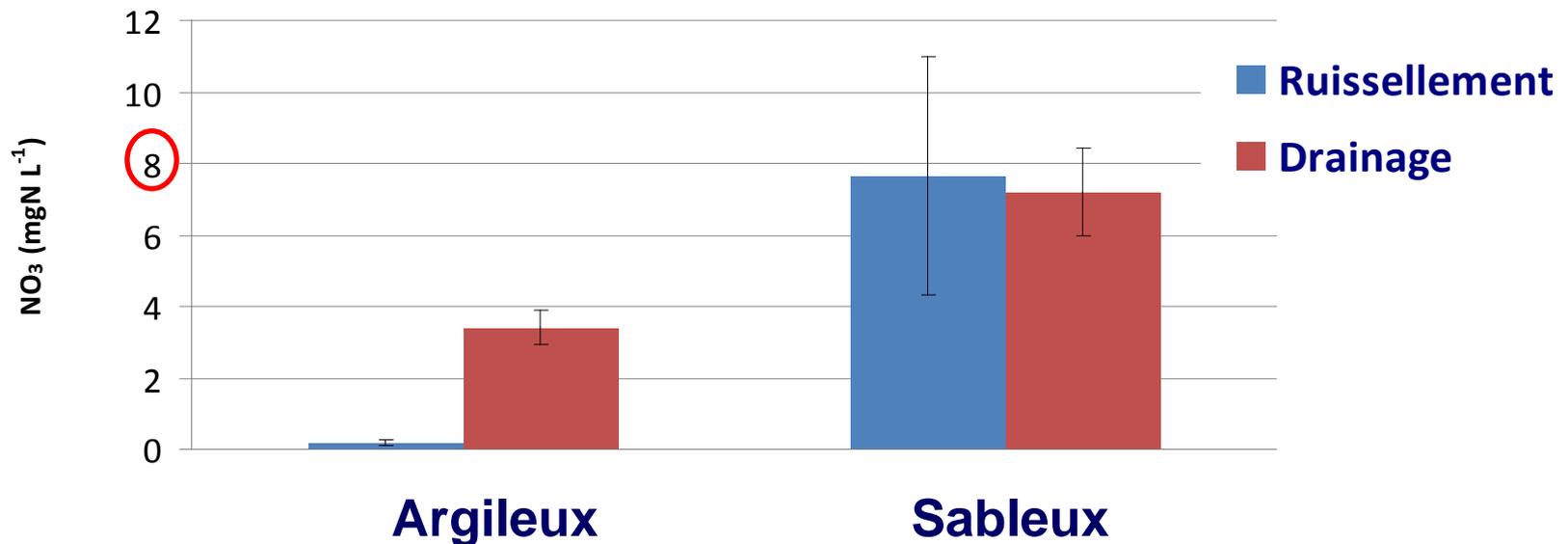
- Analyse des formes et des sources de N à l'échelle du champ:
 - NO_3 , N dissous, N particulaire
 - $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{18}\text{O}$
- Recours au signal de la conductivité électrique de l'eau pour:
 - Décrire le cheminement de N dans le profil du sol



Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

Retracer les cheminements hydrologiques de N

Concentrations moyennes de NO_3 observées au drain et dans le ruissellement de surface

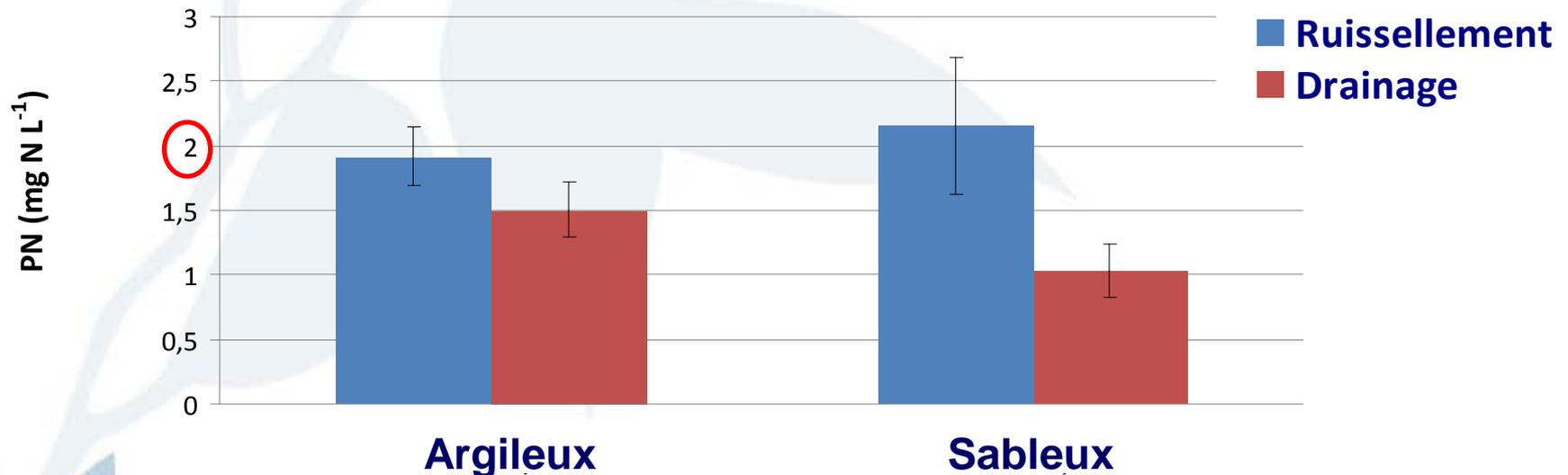


- ✓ Concentration en $\text{NO}_3\text{-N}$ plus élevée dans l'eau des drains que dans l'eau de ruissellement pour le sol argileux
- ✓ Plus grande perte de $\text{NO}_3\text{-N}$ en sol sableux qu'en sol argileux

Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

Retracer les cheminements hydrologiques de N

Concentrations moyennes de N particulaire observées au drain et dans le ruissellement de surface



- ✓ Quantités importantes de N particulaire dans l'eau de ruissellement ainsi que l'eau de drain

Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments Retracer les cheminements hydrologiques de N

Source de N particulière observée au drain

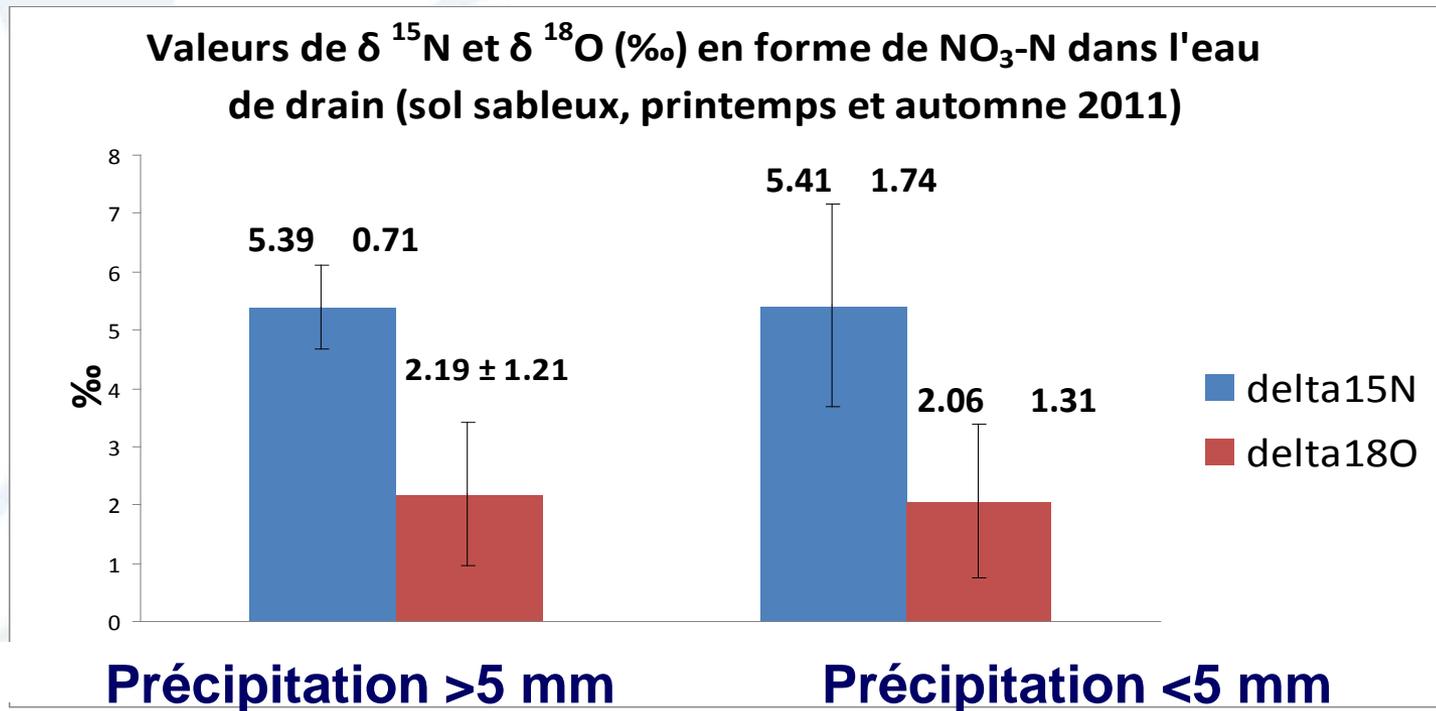
Valeur moyenne de $\delta^{15}\text{N}$ (‰) associé avec les sédiments dans l'eau de drain, échantillons de printemps 2011.

	Sol argileux			Sol sableux		
	moyenne	max.	min.	moyenne	max.	min.
$\delta^{15}\text{N-PN}$	5.46±0.74	6.30	4.31	5.02±1.58	7.7	3.3

- $\delta^{15}\text{N}$ dans le lisier bovin = 5 ‰
- Valeurs moyennes de $\delta^{15}\text{N}$ dans le sol non-cultivé:
Argileux = 6.21 ‰
Sableux = 2.61 ‰
- La source de l'azote associée avec les sédiments pourrait être
 - (1) l'engrais de ferme
 - (2) la matière organique enrichie par l'activité microbienne

Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments Retracer les cheminements hydrologiques de N

Source de NO_3 observée au drain

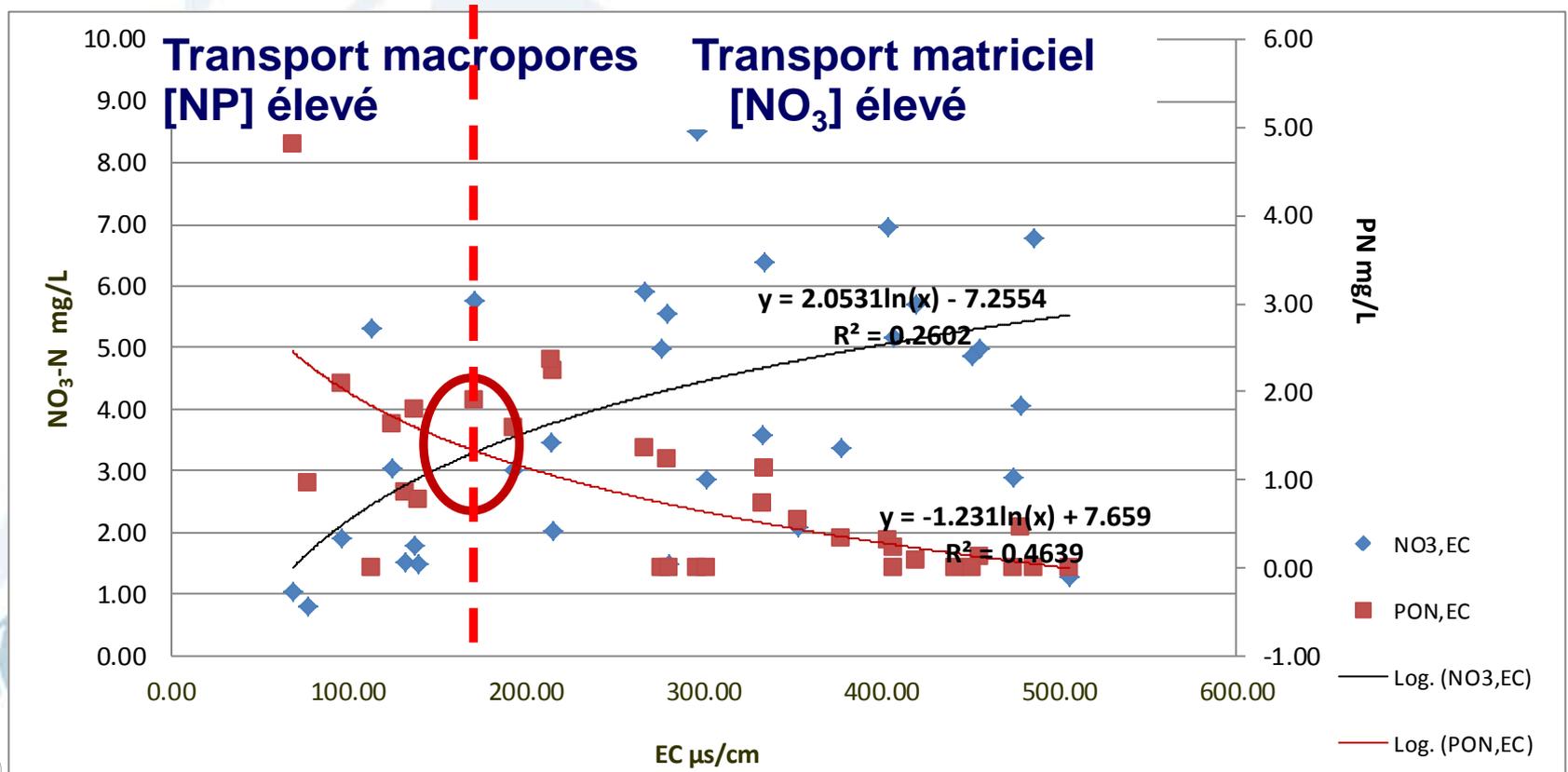


- Valeurs $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3$ dans le même intervalle que la matière organique (2 à 8 ‰).
- Valeurs $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3$ à partir de -10 à +10‰, indicatif de NO_3 dérivé des processus microbiens (minéralisation, nitrification) ou de l'azote résiduel de l'engrais de ferme.

Décrire et Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

Retracer les cheminements hydrologiques de N

La conductivité électrique: un traceur éloquent du cheminement préférentiel et de la composition du N dans les eaux de drainage



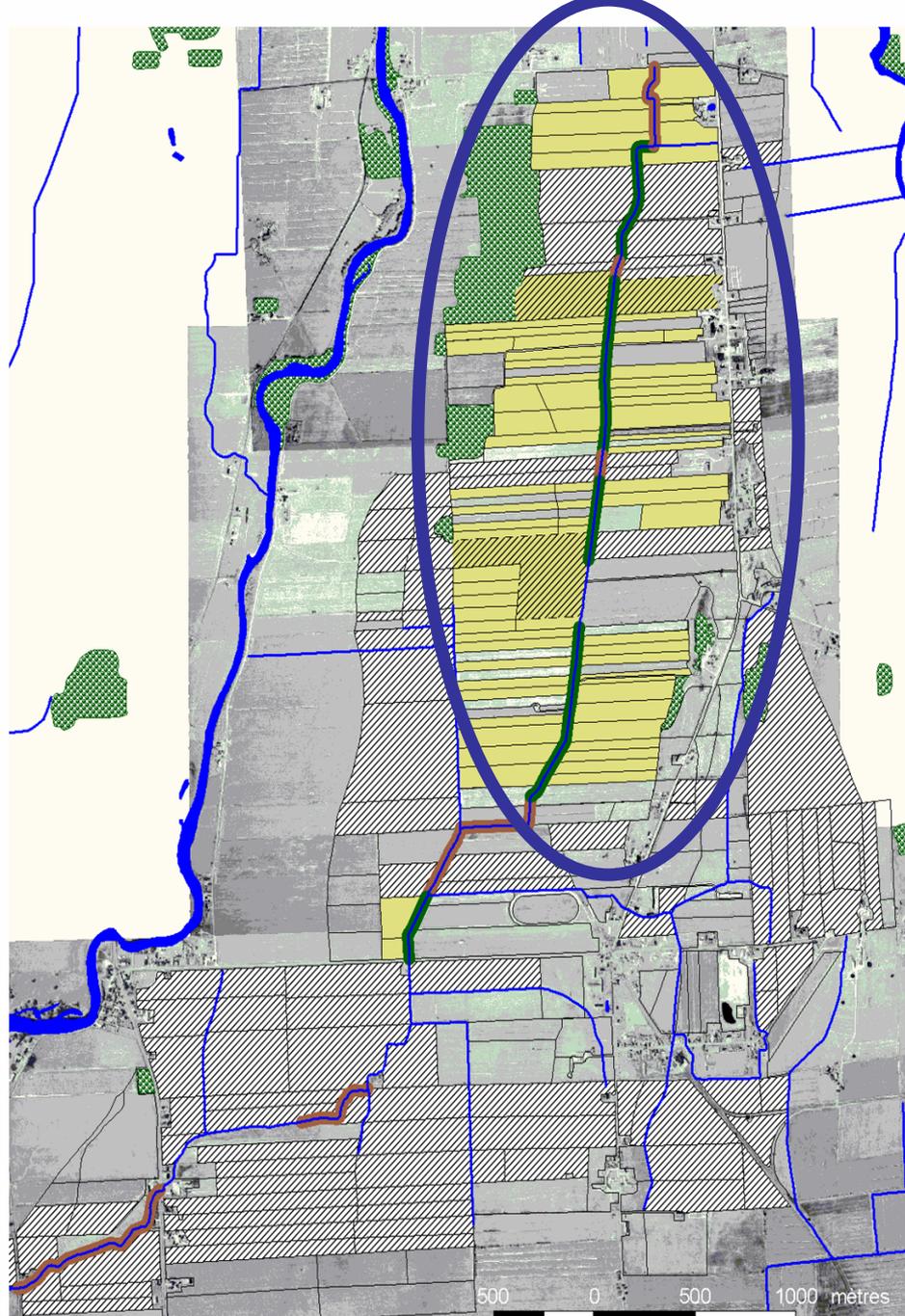
CE critique = 98 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Evaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales – Dispositif du Ruisseau au Castor

Objectif: Déterminer l'influence à long terme des aménagements riverains et des structures de contrôle du ruissellement sur l'exportation et la spéciation du P – Dispositif Castors

Approche méthodologique:

- **Monitoring à l'exutoire du bassin versant (10 km²):
Sondes multi-paramètres en continu, hydrométrie et échantillonnage des crues**
- **Période de référence 1997-1999**
- **Périodes d'évaluation 1999-2011**
- **Analyse de covariance des concentrations de P utilisant le débit en covariable**



Watershed treatment

Aménagement riverain

-  Branches de cours d'eau
-  Bande arbustive
-  Bande herbacée

Drainage

-  Drains souterrains
-  Captage par avaloirs
-  Drains + Captages

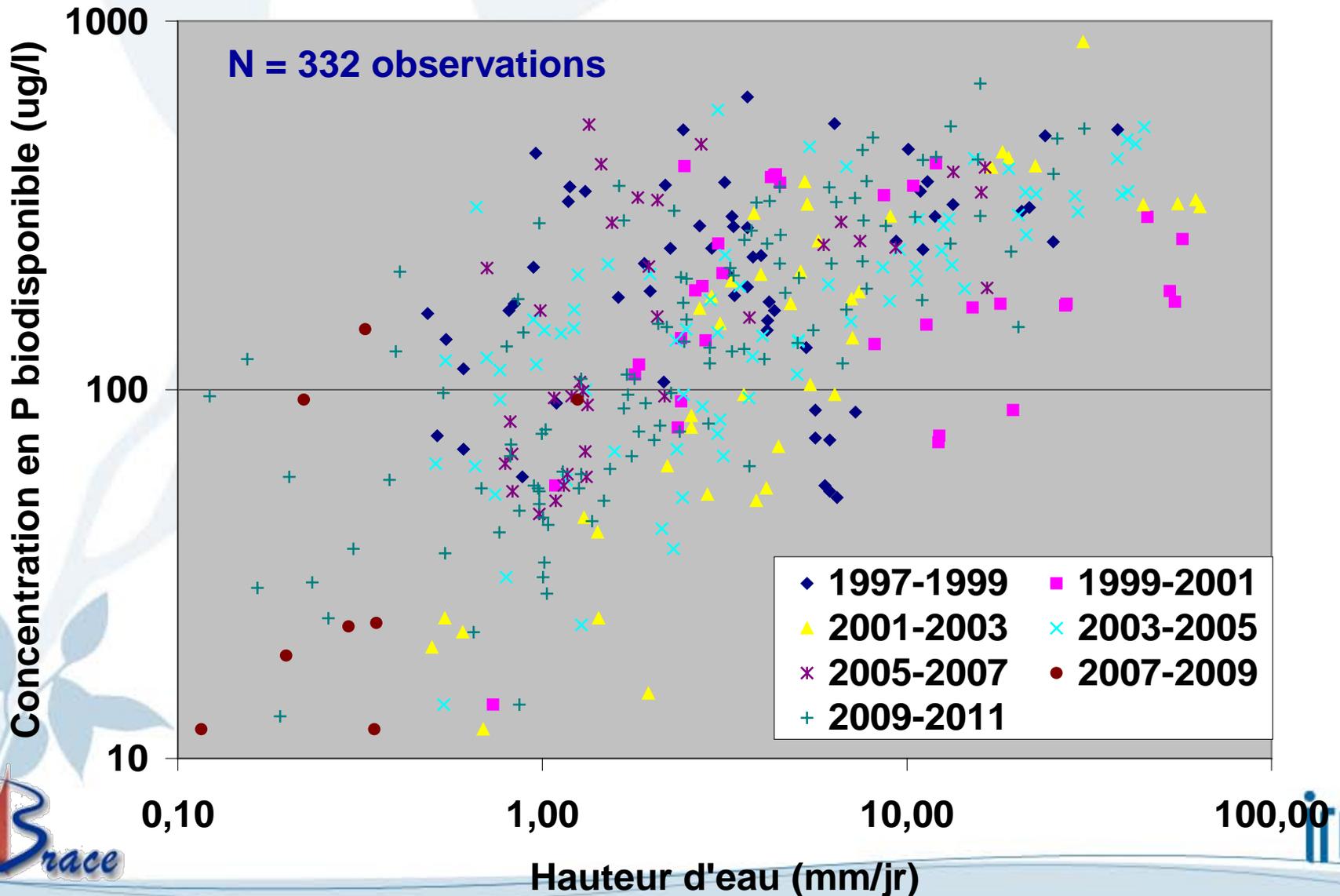
Mise à jour des PAEF

Régie des épandages

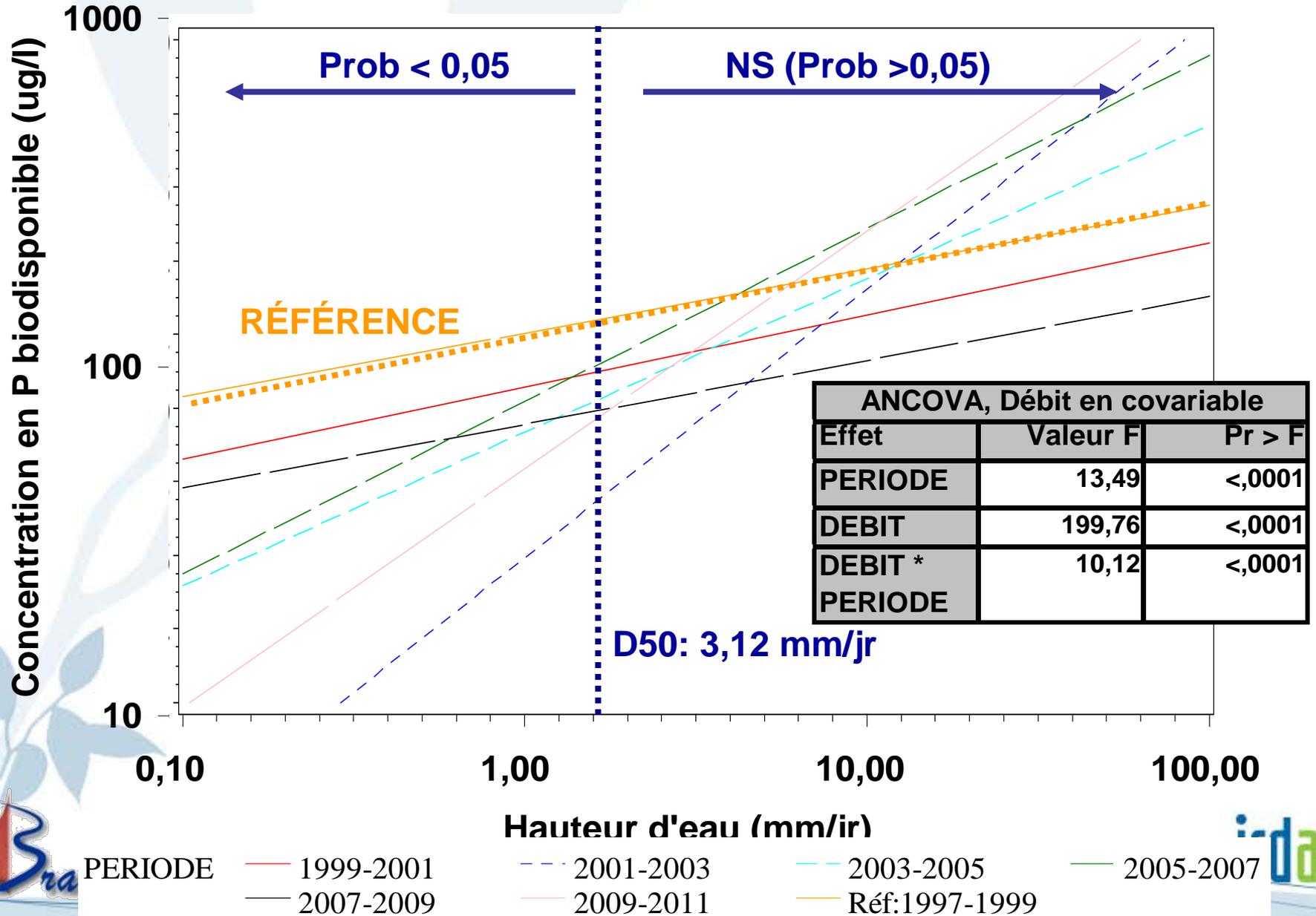


Source: Lauzier, (1999)

Evaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales – Dispositif du Ruisseau au Castor



Évaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales – Dispositif du Ruisseau au Castor



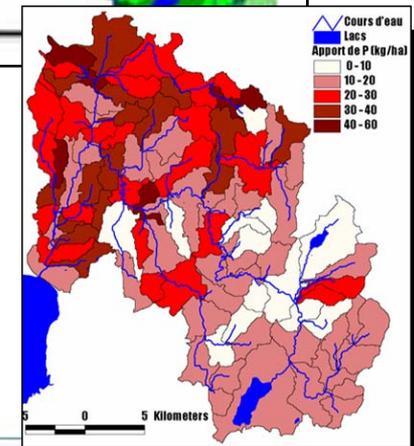
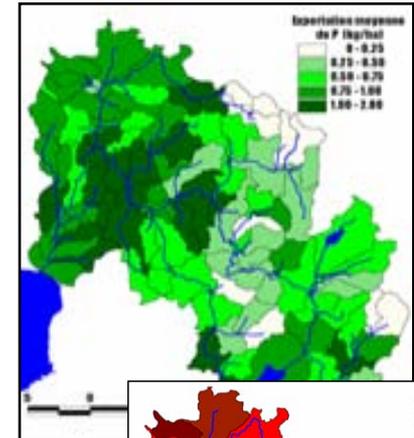
Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

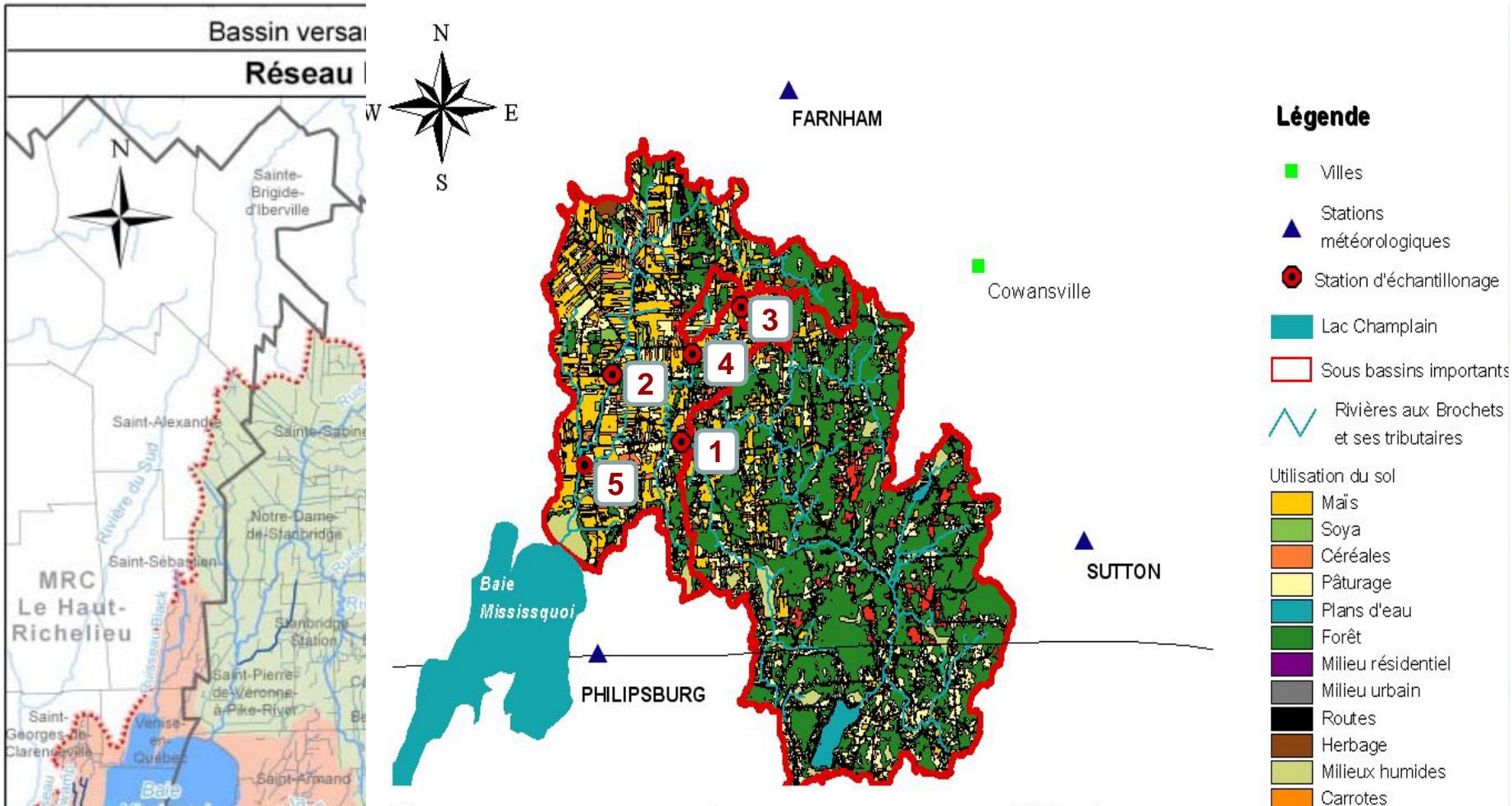
Modélisation hydrologique des coefficients d'exportation du P

Objectif: Générer les coefficients d'exportation du P à l'échelle du territoire

Approche méthodologique:

- Utilisation du modèle SWAT-Qc (Beaudin et col., 2008): meilleur prise en compte des écoulements au drain
- Calage et validation des prédictions hydrologiques et des flux de nutriments pour des bassins et des périodes distinctes (1980 à 2000)





Stations de mesure des débits et de la qualité de l'eau

1

2

Calibration et validation hydrologique (2001-2006)

3

4

Calibration et validation de la qualité de l'eau (2001-2006)

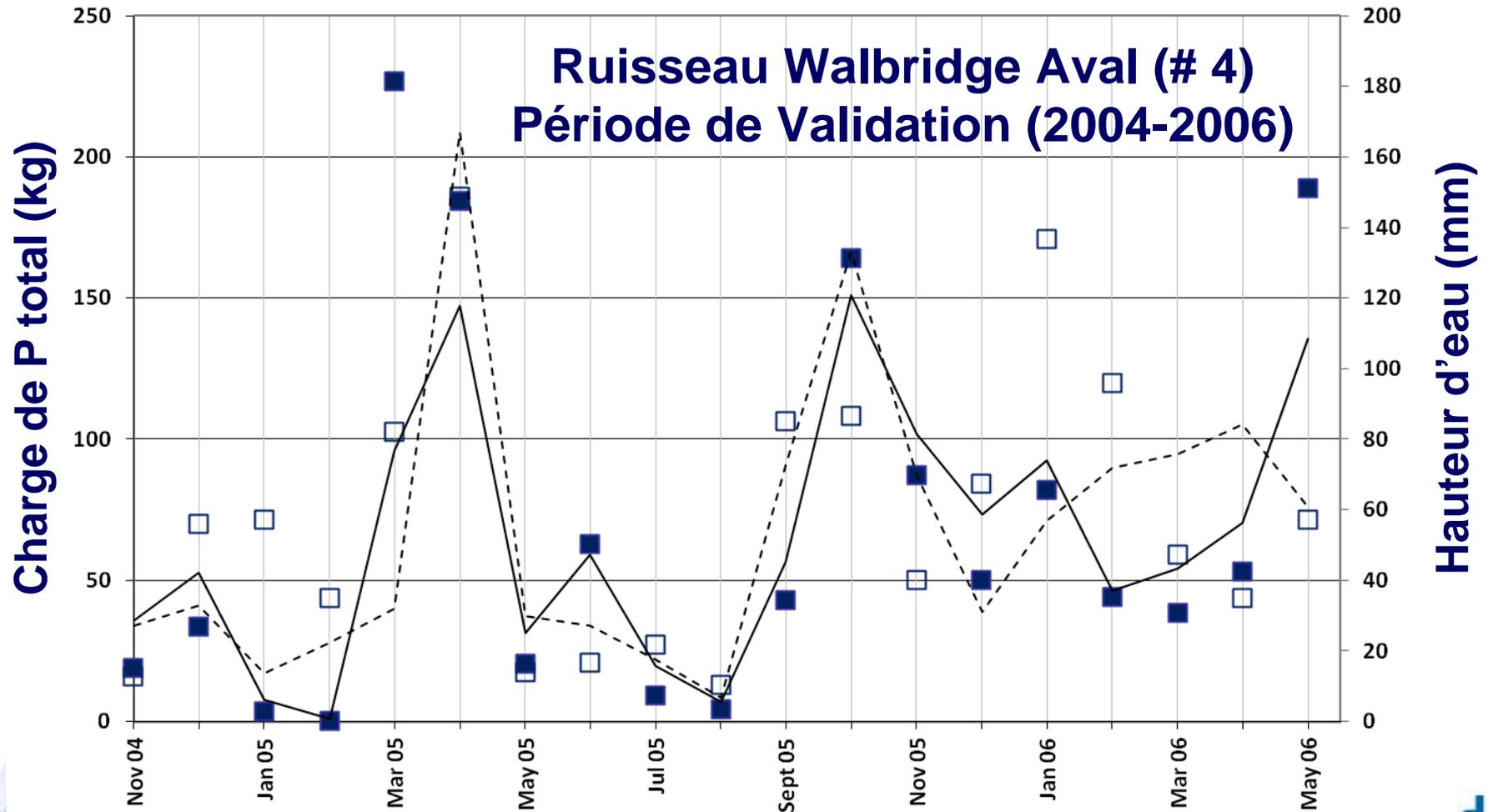
5

Validation de qualité de l'eau (1980-2000)

Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

Modélisation hydrologique des coefficients d'exportation du P

- Charge en P mesurée
- Charge en P prédite
- Débit mesuré
- - - Débit prédit



Prédire les transferts et la spéciation des nutriments
Modélisation hydrologique des coefficients d'exportation du P
Ruisseau Walbridge Aval (# 4)
Période de Validation (2004-2006)

Échelle Mensuelle	Walbridge amont (#3)			Walbridge aval (#4)		
	R ²	NS	% Dev	R ²	NS	% Dev
Débits	0.87	0.85	-6	0.75	0.71	-3
Sédiments	0.70	0.64	-2	0.59	0.44	-18
Phosphore	0.75	0.71	-16	0.67	0.61	1
Azote	0.78	0.69	-6	0.74	0.68	-10

Critère de performance suggérés par Moriasi et al, (2007):

R²>0.5; NS >0.6 Dev> ±15 % pour l'hydro ; ± 55% pour sed et ± 70% pour P et N.

Prédire les transferts et la spéciation des nutriments

Modélisation hydrologique des coefficients d'exportation du P

Occupation du sol	Coefficient d'exportation P tot kg/ha/an			
	Cette étude		Étude précédente Deslandes et al., (2000-2003)	Bassin Missisquoi (VT) Stone Env. (2011) (1980-2009)
	2001- 2003	1980- 2000		
Maïs	1.74	2.5	2.48	2.10 (1.99, maïs-foin)
Soya	1.10	1.32	1.12	3.78 (soya-maïs)
Céréales	1.26	1.70	0.75	-
Prairie	0.58	0.82	0.39	0.88
Jachère	0.44	0.48	-	0.18
Pommes	0.4	0.4	0.09	-
Forêt	0.2	0.2	0.02	0.14
Urbain	0.39	0.4	1.95	1.17-0.61
Milieu Humide	0.3	0.29	-	0.72
Exploitations agr	-	-	-	3.05-3.12
Bassin entier	0.69	0.91	0.74	0.43

Décrire la dynamique des cyanobactéries

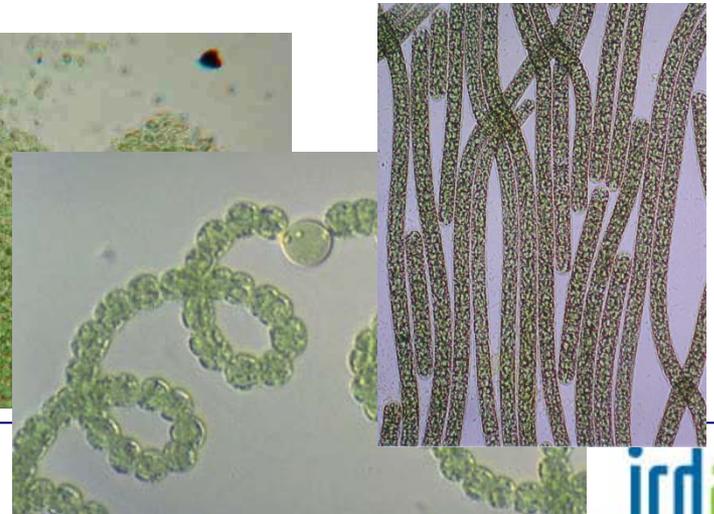
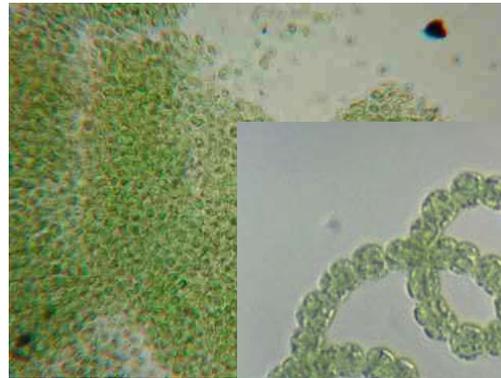
- Objectif: Caractériser la spéciation des cyanobactéries dans la baie Missisquoi.



Approche méthodologique:

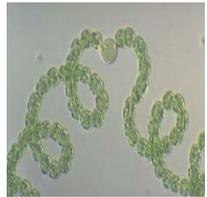
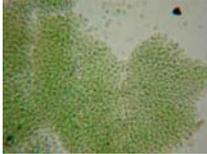
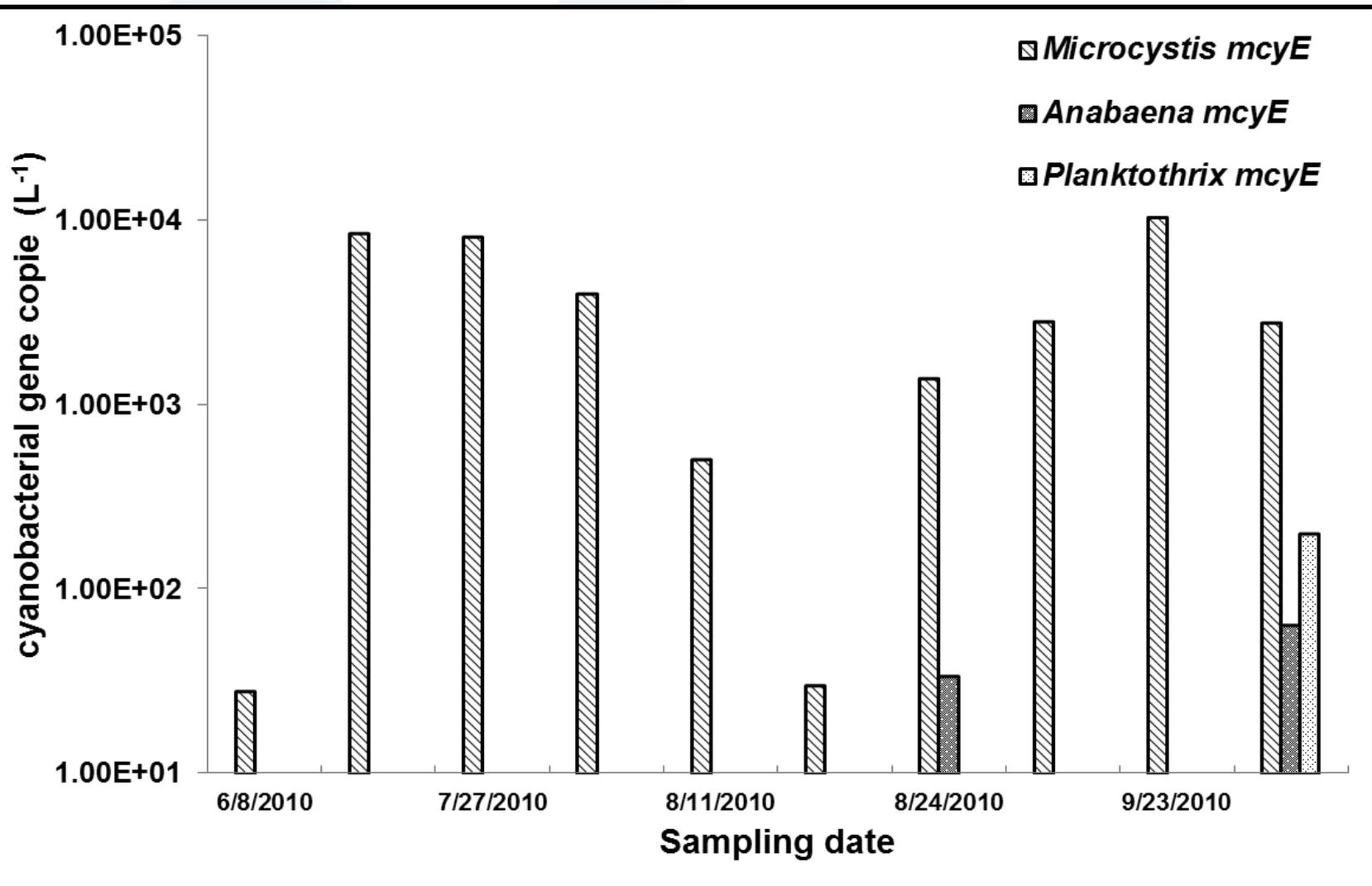
- Développement d'une méthode de *quantitative real-time polymerase chain reaction* (qPCR) pour évaluer la présence des espèces toxiques et non-toxiques de cyanobactéries dans la baie Missisquoi
- Espèces toxiques détectées:

Microcystis
Anabaena
Planktothrix



Décrire la dynamique des cyanobactéries

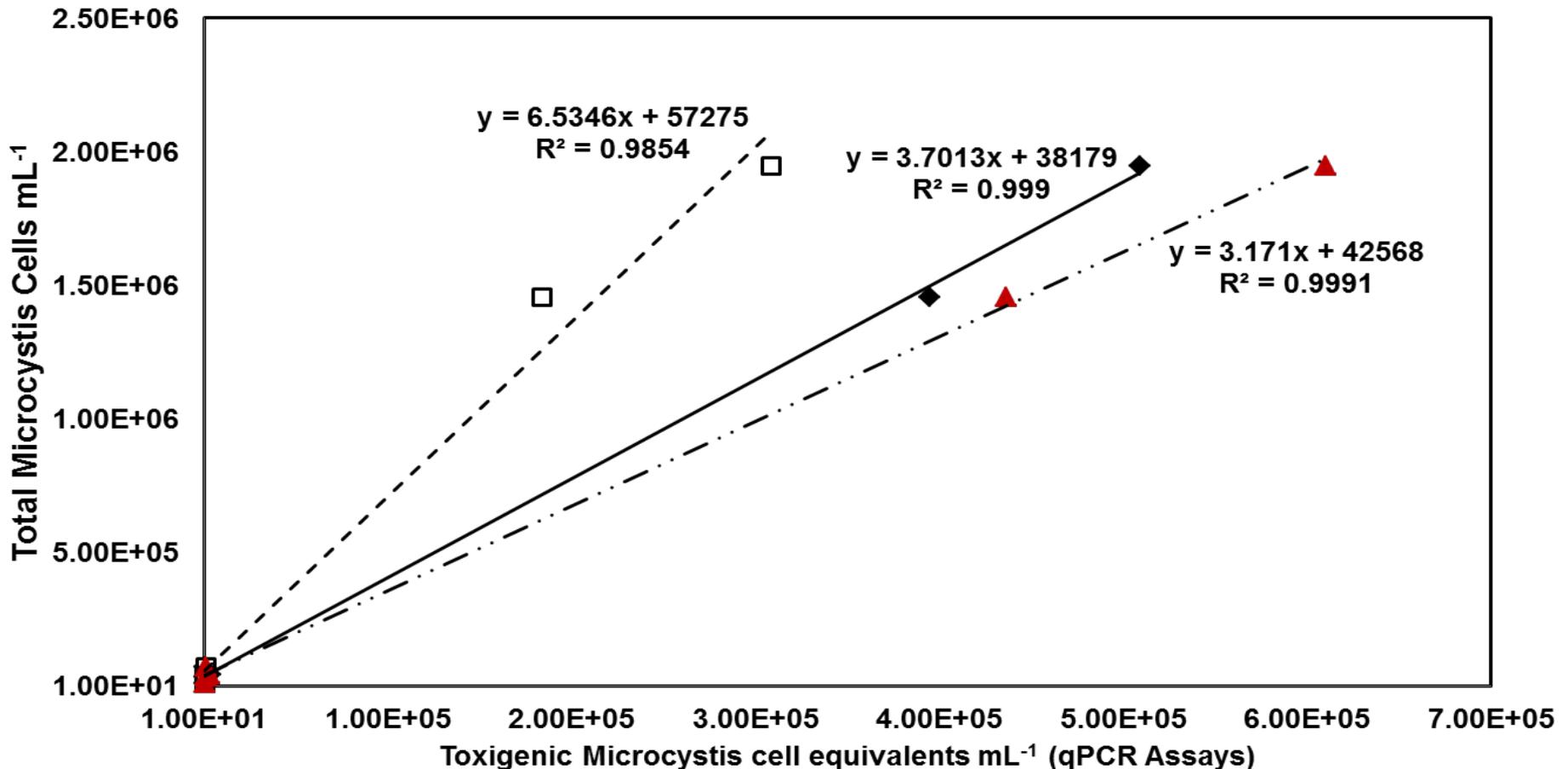
Dynamique des populations cyanobactériennes



Décrire la dynamique des cyanobactéries

Proportion des cyanobactéries toxiques

- ◆ Total Microcystis vs Microcystis mcyA cell equivalent
- Total Microcystis vs Microcystis mcyE
- ▲ Total Microcystis vs Microcystis mcyG



Conclusions

Un ensemble d'outils innovateurs et de livrables à portée opérationnelle:

- ***Des coefficients d'exportations du P validés en bassins versants expérimentaux***
- ***Une méthode validée de séparation des cheminements hydrologiques basée sur la conductivité électrique***
- ***Un modèle de simulation hydrologique (SWAT-Qc) adapté au contexte hydro-pédologique québécois***
- ***Un indicateur des sources d'azote (^{15}N)***
- ***Une méthode de quantification des cyanobactéries toxigènes (qPCR) précise et rapide***

REMERCIEMENTS

- Les partenaires du Programme de recherche en partenariat sur les cyanobactéries du Fonds de recherche du Québec - Nature et technologie
- Richard Lauzier, Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec
- La Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets
- L'équipe du DuraClub, Club-conseil en agroenvironnement
- L'équipe du Centre d'expertises hydriques du Québec (MDDEP)

*Agriculture, Pêcheries
et Alimentation*

Québec 

*Développement durable,
Environnement
et Parcs*

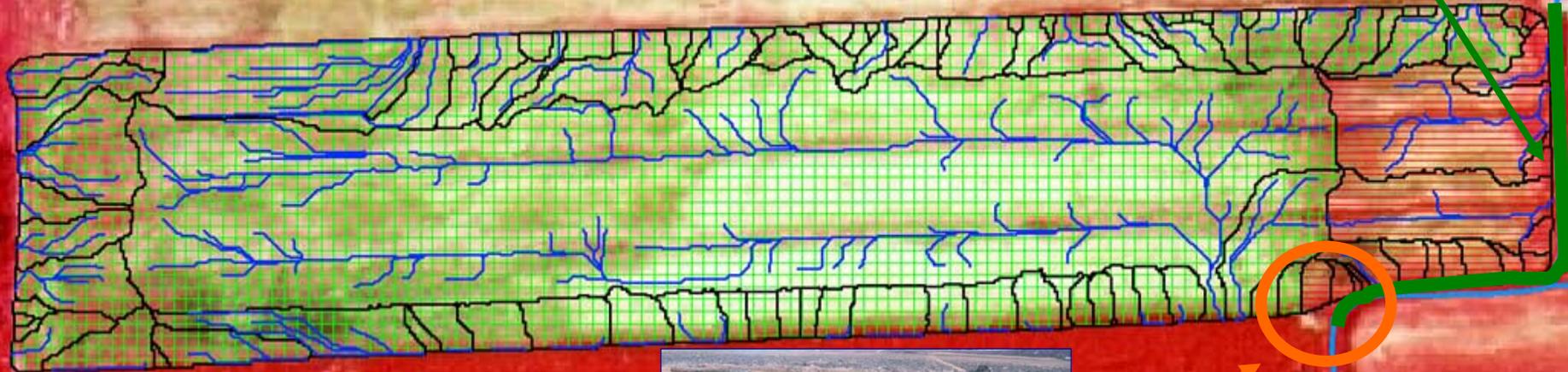
Québec 



Évaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales – Dispositif du Ruisseau au Castor



-  Cours d'eau
-  Cheminement de surface
-  Ecoulement au cours d'eau
-  Ecoulement au fossé



100 mètres



Evaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales – Dispositif du Ruisseau Ewing



**Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière Au Brochet et MAPAQ, 2009;
Photo: Richard Lauzier.**

Evaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales – Dispositif du Ruisseau Ewing

Projet LISIÈRE VERTE: Projet pilote sur la rétribution des biens et services environnementaux ¹

- Coopérative de Solidarité du bassin versant de la Rivière aux Brochets
- Territoire de 53 km²
- 58 fermes participantes (total de 62 dans les bassins ciblés)
- Entre 2007 et 2009:
 - 78 km de bandes riveraines aménagées
 - 650 structures de contrôles du ruissellement

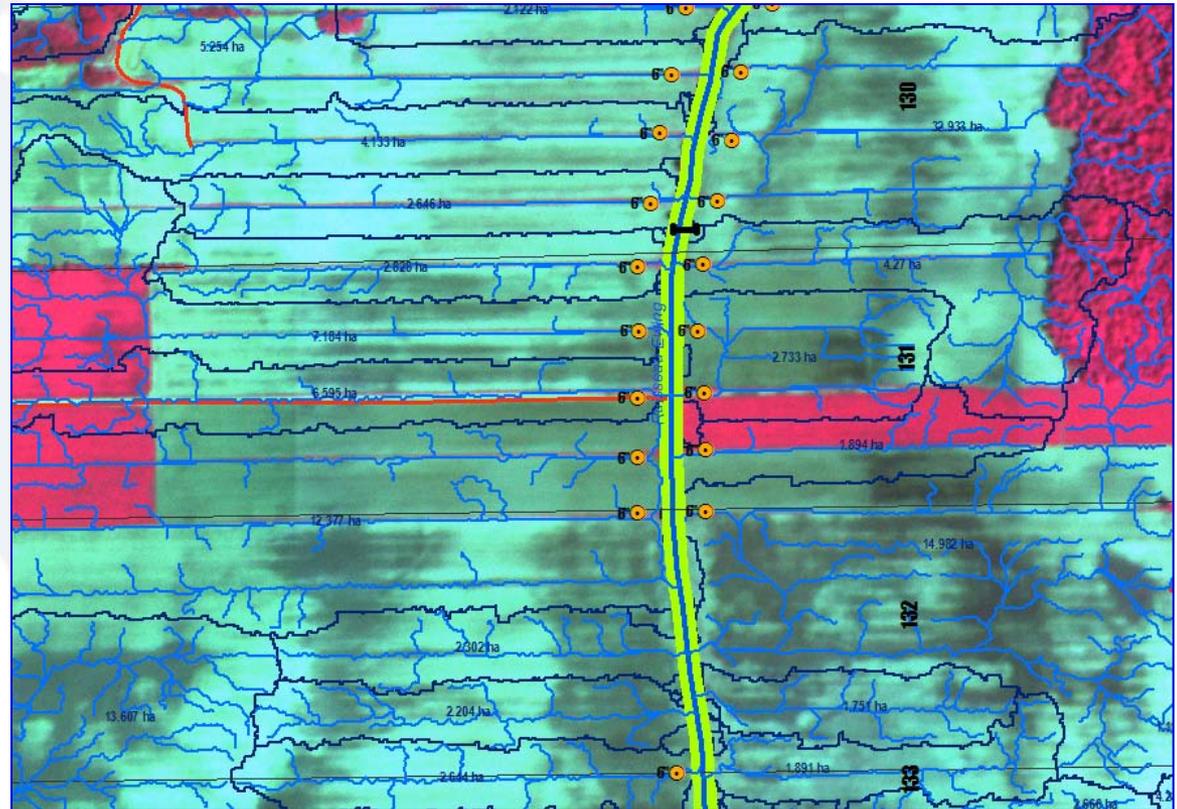
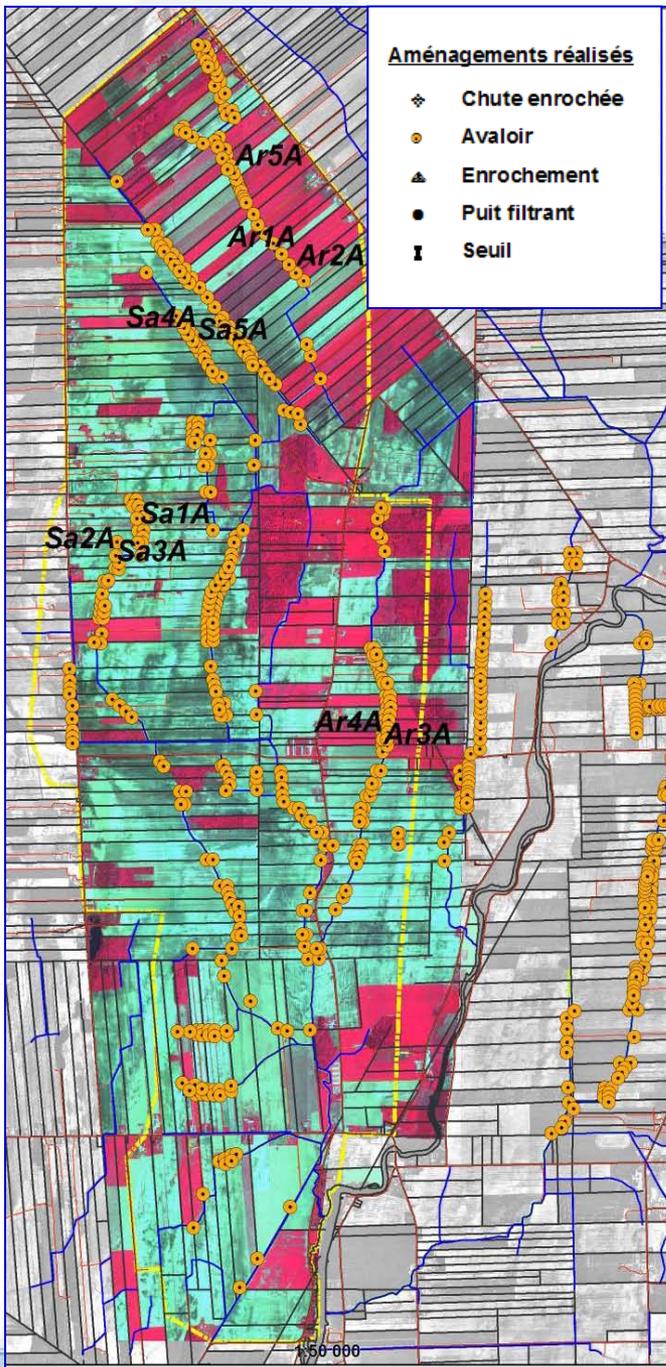


¹ Le projet pilote sur la rétribution des biens et services environnementaux a profité du soutien financier du programme PAASCA (AAC, 2007)

Evaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales – Dispositif du Ruisseau Ewing

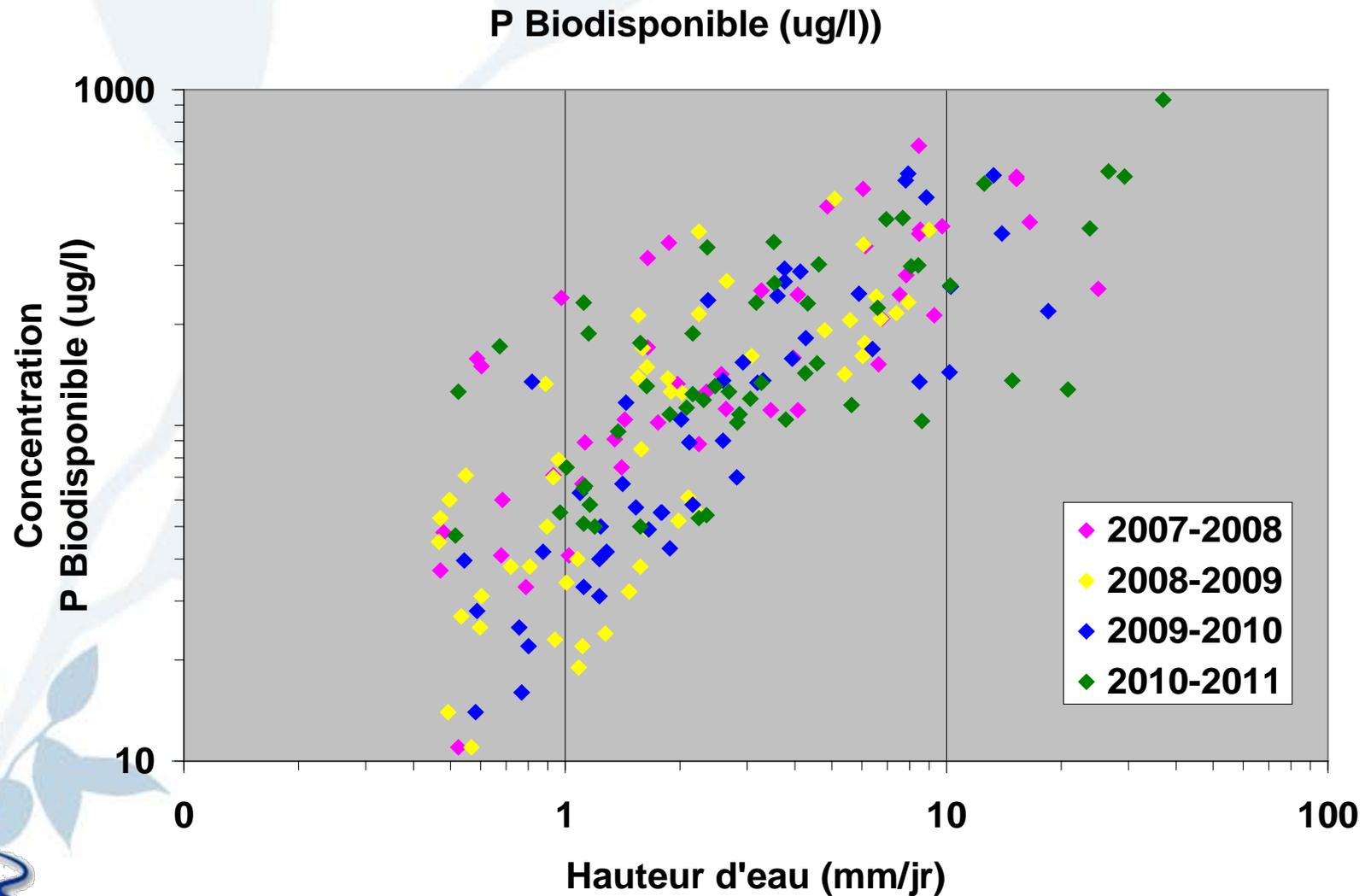
Aménagements réalisés

- ❖ Chute enrochée
- Avaloir
- ▲ Enrochement
- Puit filtrant
- I Seuil



- Cours d'eau verbalisé (1984)
- Routes
- Cadastre
- Parcours de l'eau principal du micro-bassin
- Micro-bassins
- Bandes riveraines de 10 mètres projetées

Evaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales – Dispositif du Ruisseau Ewing



Évaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions environnementales – Dispositif du Ruisseau Ewing

