

La télédétection en appui à la gestion localisée des champs : Perspectives du projet ReZoTaGe

AUBERT MICHAUD¹, ARIANE DROUIN¹, MARC-OLIVIER GASSER¹, ISABELLE BEAUDIN¹, JEAN-DANIEL SYLVAIN², LUC BELZILE¹, JACQUES DESJARDINS¹, NOÉMI CÔTÉ¹

¹Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

²Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune

Courriel: aubert.michaud@irda.qc.ca Site internet: www.irda.qc.ca

Mots clés : Télédétection, rendement optimum, gestion localisée, azote, qualité des sols.

Introduction

Deux principaux constats ont pavé la voie à la réalisation du projet de recherche à la ferme RéZoTaGe. D'une part, l'aménagement hydro-agricole et le cadastre allongé et étroit des terres au Québec, orienté suivant le sens de la pente, favorise la variabilité des propriétés des sols à l'échelle du même champ. Cette variabilité n'est généralement pas prise en compte dans la régie des champs. D'autre part, des pertes d'azote élevées, atteignant plus de 60 kg N/ha en moyenne sur certains bassins de la Montérégie dominés par la culture du maïs-grain (Michaud et al., 2009; 2012), témoignent de l'opportunité de gains économiques et environnementaux importants découlant d'une meilleure gestion de la fertilisation azotée. L'objectif principal du projet consistait à évaluer si une approche de gestion localisée du parcellaire, appuyée par la reconnaissance par télédétection de la variabilité des propriétés des sols, permettait de mieux cerner les besoins en fertilisation azotée de la culture du maïs, d'en soutenir le rendement économique optimal, tout en prévenant l'accumulation des reliquats d'azote dans le sol en fin de saison et les pertes vers le cours d'eau. Concrètement, la mise en œuvre d'une approche de gestion localisée des champs comporte plusieurs étapes: 1) la reconnaissance de propriétés contrastantes de sol à l'échelle du champ 2) l'observation d'un comportement distinct des cultures en fonction des zones de gestion identifiées et d'un élément de régie, en l'occurrence la fertilisation azotée et finalement, 3), l'analyse de la rentabilité économique d'une telle opération. En réponse à ces trois objectifs opérationnels, trois volets d'étude à portée géomatique, agronomique et économique ont été déployés. Un quatrième volet, à portée hydrologique, a traduit les résultats du volet agronomique à l'échelle du champ, en termes de retombées environnementales à l'échelle du bassin versant.

Appréhender la variabilité spatiale des propriétés des sols à l'échelle du champ

Le volet géomatique du projet ciblait l'application et la validation de la méthode originale de reconnaissance des propriétés du sol développée par Sylvain et al. (2011, 2012) aux trois régions d'étude ciblées par le projet, soit la Baie Lavallière (326 km²), la Baie Missisquoi (514 km²), et la rivière Esturgeon (473 km²). La méthode s'appuie sur la mise en relation d'indices topographiques dérivés de modèles numériques d'élévation, combinés à des indices spectraux dérivées d'images multi-spectrales satellitaires, ainsi que des observations ponctuelles de propriétés des sols colligées lors de campagnes de prospection pédologique. Dans les trois bassins versants à l'étude, les résultats de prédiction des propriétés texturales et des classes de drainage se sont avérés satisfaisants. L'indication de fortes probabilités de propriétés distinctes à l'intérieur d'un même champ devrait appuyer le producteur et son conseiller dans la délimitation et l'intervention sur des zones de gestion localisées ou intra-parcellaires. Ces zones pourraient dès lors profiter d'un échantillonnage localisé des propriétés du sol, permettant à terme de valider la pertinence de moduler la régie entre les zones selon la variabilité de ces propriétés.

Évaluer la pertinence de la gestion localisée

Alors que le volet télédétection du projet avait pour objectif de reconnaître la variabilité des propriétés des sols, le volet agronomique a évalué si la gestion de cette variabilité était pertinente, gérable et payante. En collaboration avec les équipes de services-conseils partenaires au projet (Dura-Club, Club Lavallière et Agro-moisson), un réseau d'essais de fertilisation azotée dans le maïs-grain a été établi dans 58 champs au cours des saisons 2012 et 2013, suivant des protocoles similaires à N'Dayegamiye et al. (2009) et Giroux et al. (2009). Le dispositif comprenait deux zones d'études par champ basées sur les propriétés contrastantes des sols, dans lesquelles des doses croissantes de N (0, 50, 100 150 et 200 kg N/ha) ont été apportées en post levée dans des parcelles de maïs répétées trois fois. Les résultats démontrent que des réductions dans les apports de N étaient motivées pour plus de la moitié des champs

à l'étude, résultant en une réduction potentielle moyenne de 66 kg N/ha, par rapport à un taux de référence de 150 kg N/ha en post-levée. Les corrélations évaluées entre les courbes de réponses et les propriétés du sol confirment jusqu'à un certain point ($R^2 = 0,29$) la pertinence de considérer l'analyse de nitrates en post-levée dans les recommandations de fertilisation azotée. Au-delà du seuil de 25 ppm N-NO₃, l'effet des apports de N sur le rendement du maïs demeure marginal. Les fournitures élevées du sol en azote sur certains sites renforcent par ailleurs la pertinence de prendre en compte la minéralisation de l'azote organique du sol, les reliquats de fertilisation automnale et les arrières-effets des engrains dans les recommandations de N. Les corrélations entre les indicateurs de la structure du sol et les taux de nitrates observés en post-levée suggèrent par ailleurs une influence de la condition physique du sol sur le processus de minéralisation de l'azote organique présent dans le sol. Ces observations témoignent de l'importance de maintenir un taux de matière organique élevé et une condition physique du sol favorable à la minéralisation de l'azote durant la croissance de la culture.

Les concentrations en nitrates résiduels du sol (NRS) observées en fin de saison mettent en évidence le lien entre l'ajustement de la fertilisation azotée de la culture et le stock d'azote du sol inutilisé à la fin de la saison de croissance. Le seuil critique de teneurs en nitrates résiduels de 80 kg N-NO₃/ha est atteint lorsque l'apport d'azote excède d'environ 100 kg N/ha, en moyenne, la dose optimale. Bien que la teneur en nitrates observée en post-levée soit faiblement corrélée ($R^2 = 0,10$) avec le rendement optimal de la culture de maïs, ce dernier n'est pas corrélé avec le stock de nitrates présent dans le sol en fin de saison. Une implication pratique de cette observation est que la fertilisation du maïs au taux optimal d'azote, qui prend en considération la fourniture du sol N (taux de nitrates en post-levée) permet des rendements économiques optimaux, tout en limitant le risque d'accumuler des nitrates en fin de saison. Il y a donc complémentarité entre les objectifs de rendement économique et environnementaux. L'analyse économique de sensibilité inspirée de ces résultats agronomiques suggère que dans la perspective d'un investissement de 50 000 \$ dans un système de géolocalisation, le seuil de rentabilité serait atteint du moment qu'une réduction moyenne de 24 kg N/ha ou plus serait obtenue.

Prédire et gérer le devenir de l'azote dans l'environnement

Le volet hydrologique du projet a mis à profit l'adaptation québécoise du modèle SWAT, calé et validé sur la base de suivis hydrologiques des petits bassins versants expérimentaux de la Montérégie (Michaud et col, 2007; 2009). Ce volet de l'étude a permis de reproduire de façon satisfaisante les écoulements de surface et souterrains, de même que les flux journaliers de nitrates observés aux exutoires des ruisseaux Walbridge (<8km²), tributaires de la Rivière au Brochet dans le bassin versant de la Baie Missisquoi. Les résultats des scénarios de fertilisation azotée du maïs indiquent que le passage d'une fertilisation en pré-semis à des apports fractionnés en post-levée diminue les pertes prédictes de N dans l'environnement de l'ordre de 50 à 70%. La prévention de la sur-fertilisation offre aussi l'opportunité de réduire de façon encore plus marquée les pertes annuelles prédictes de nitrates. L'augmentation des apports en post-levée de 100 kg N/ha au-dessus du taux de référence de 150 N double les prédictions d'exportation de nitrates vers le ruisseau. La cohérence entre les prédictions du devenir de l'azote dans le volet hydrologique du projet avec les reliquats de N observés dans les parcelles au volet agronomique du projet illustre le besoin d'études à portée hydrologique dans le développement des outils de recommandation de la fertilisation azotée des cultures.

Références

- Giroux, M., J.-B. Sarr et A, N'Dayegamiye. 2009. Influence des apports d'engrais azotés sur l'efficacité de l'azote et les teneurs en nitrates résiduels des sols cultivés en maïs grain Rapport de recherche. IRDA.
- N'Dayegamiye, A., M.-O- Gasser, M. Grenier, M. Giroux, C. Landry, S.P. Guertin et Gilles Tremblay. 2009. Choix d'indicateurs efficaces pour prédire la fertilité azotée des sols. 2009. Rapport de recherche. IRDA.
- Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C. A. Madramootoo. 2007. Can. J. Soil science, 87(3): 329-344.
- Michaud, A.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. IRDA.
- Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. IRDA.
- Sylvain J.-D. 2011. Mémoire de Maîtrise. Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke.
- Sylvain, J-D, A.R. Michaud, M.C. Nolin et G.B. Bénié. 2012. Digital Soil Assessments and Beyond. Minasy, Malone et McBratney (eds) ISBN 978-0-415-62155-7. Pp. 381-386.

La télédétection en appui à la gestion localisée des champs: Perspectives du projet ReZoTaGe

**AUBERT MICHAUD, ARIANE DROUIN, MARC-OLIVIER
GASSER, ISABELLE BEAUDIN, JEAN-DANIEL SYLVAIN,
LUC BELZILE, JACQUES DESJARDINS, NOÉMI CÔTÉ**



*Institut de recherche et de
développement en agroenvironnement
IRDA.QC.CA*



Collaborations et Soutien

Partenaires de réalisation:

- Benoît Laferrière et l'équipe du Club agroenvironnemental Lavallière
- Valérie Bouthillier-Grenier et l'équipe du Dura-Club
- Geneviève Roy et l'équipe du Club Agro-Moisson Lac Saint-Louis
- Isabelle Perron et Lucie Grenon, équipe de AAC
- Agriculteurs participants

Partenaire de financement:



PLEINETERRRE

| CULTIVER LE SAVOIR-FAIRE

Agriculture, Pêcheries
et Alimentation
Québec

Agriculture et
Agroalimentaire Canada



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

LOGIAG





Duraclub



Club Agro-Moisson Lac Saint-Louis



Club agroenvironnemental La Vallière



Objectif... Gestion localisée

1. La télédétection peut-elle bien représenter le patron spatial des propriétés des sols ?
2. Est-ce que la gestion de cette variabilité est pertinente, gérable et rentable à l'échelle de la ferme ?
3. Et enfin, quels sont les bénéfices anticipés de la gestion localisée des champs au plan de la qualité de l'eau ?

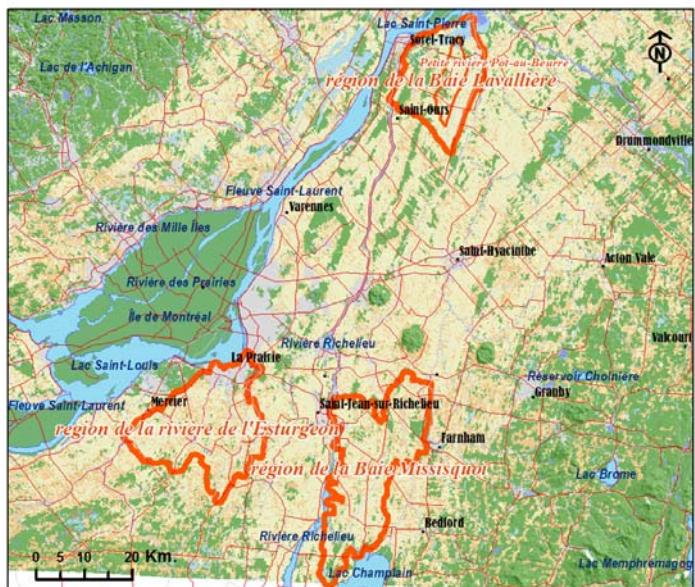


Méthodologie: Une approche en trois volets

Volet d'étude	Objectif	Echelle d'étude
Télédétection	Représenter la variabilité des sols	Trois régions 300-500 km ²
Agronomique	Évaluer la faisabilité de la gestion localisée	10 champs /région Deux zones par champ
Environnemental	Projeter les bénéfices environnementaux	Deux bassins versants (6-8 km ²)

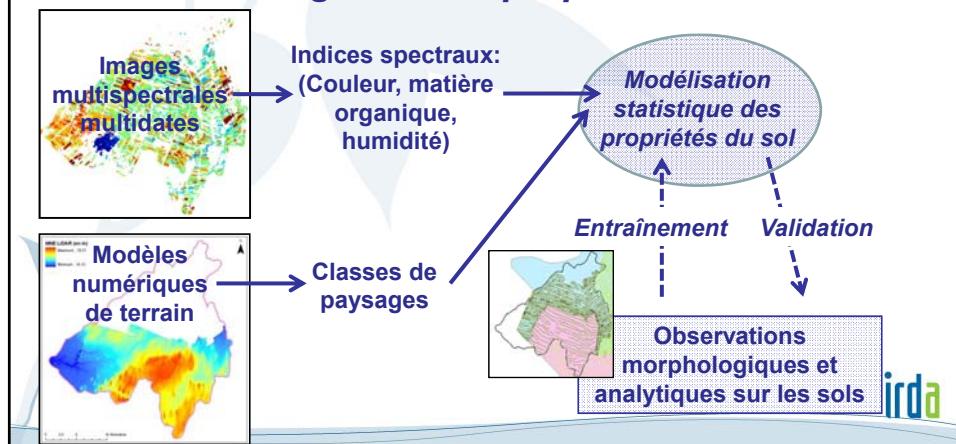


Territoires à l'étude



Volet Télédétection Représenter la variabilité des sols

Combiner le pouvoir des *images satellitaires* et
des *modèles numériques de terrain* pour
refléter l'origine et les propriétés des sols.



Volet Télédétection, méthodologie Une image vaut mille mots...

Images multispectrales

Landsat



- 15 images de 1987 à 2009
- Images de printemps pour identifier les sols nus sous culture annuelle
- Plusieurs images pour couvrir une grande gamme d'humidité des sols

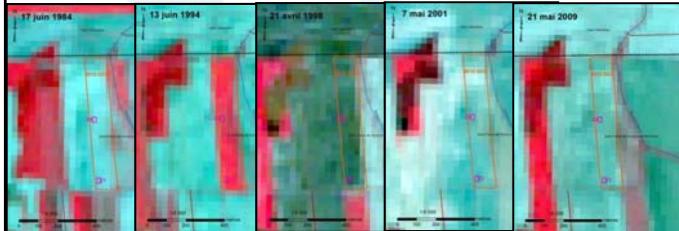
Localisation des sols nus pour chaque image



5 indices spectraux décrivant les sols nus

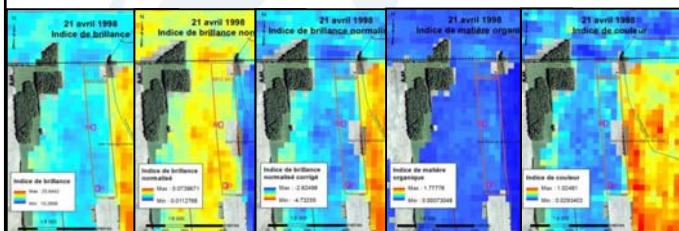
Type d'indice	
Indice de brillance des sols	$BI_{ti} = \sqrt{PIR^2 + R^2}$
Indice de matière organique	$IMO_{ti} = \frac{1}{TM2_n^2}$
Indice de couleur	$ICOm_{ti} = \frac{TM2_n}{IBSn_n}$
Indice de brillance normalisé	$IBNn_{ti} = \frac{(1 - \left(\frac{IBHn_n}{IBSn_n} \right))}{IBHn_n}$
Indice de brillance normalisé corrigé	$IBNc_{ti} = \log\left(\frac{IBSn_n \cdot TM2_n^{-1}}{IBHn_n^3}\right)$

Volet Télédétection, méthodologie Quinze images, c'est mieux !



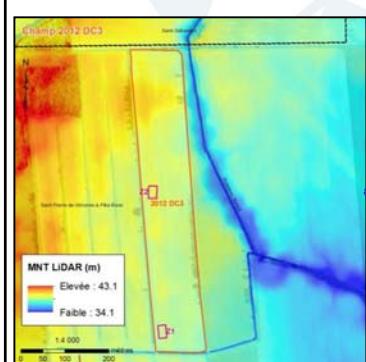
15 images
Landsat de printemps:

Pour couvrir une grande gamme d'humidité des sols

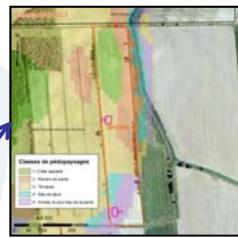


5 indices par image:
Indice de brillance (IB)
IB normalisé
IB normalisé corrigé
Indice de matière organique
Indice de couleur

Volet Télédétection, méthodologie Le relief, témoin privilégié de l'origine des matériaux et de l'écoulement des eaux



MNT LiDAR
(résolution de 1 m)



Classes de pédopaysages

- 1- Crête applatie
- 2 - Revers de pente
- 3 - Terrasse
- 4 - Bas de talus
- 5 - Niveau le plus bas de la pente



Parcours de l'eau et micro-bassins

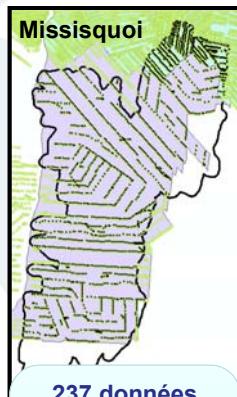
- Micro-bassin
 - Ordre de Horton (parcours de l'eau)
- 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Volet Télédétection, méthodologie
Les observations pédologiques géoréférencées: la vérité terrain



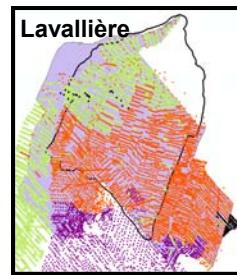
2197 données morphologiques

167 données analytiques



237 données morphologiques

113 données analytiques



34 données morphologiques

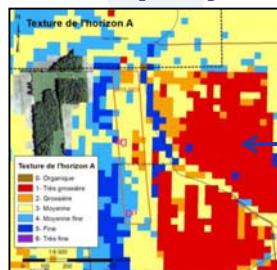
258 données analytiques

Source des cartes : Isabelle Perron, AAC, 2011

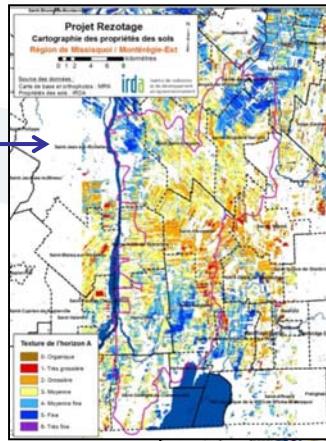


Volet Télédétection, résultats

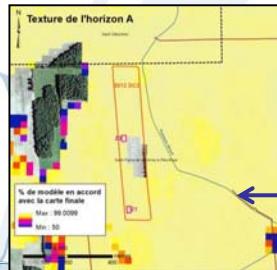
Patron spatial de la variabilité des propriétés des sols modélisées



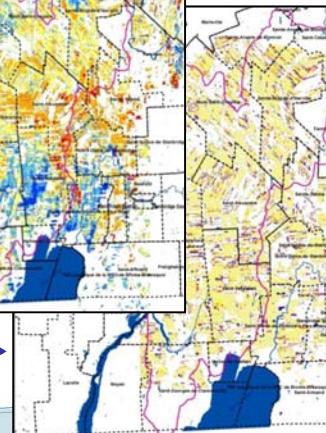
Résultats de prédiction de la texture du A



Bassin Missisquoi



% d'accord avec le modèle de la carte finale



Volet Télédétection, résultats
Ajustement des modèles de prédiction des propriétés des sols

Missisquoi – Validation à partir des données morphologiques

	Groupe de texture de l'horizon A					
	0	1	2	3	4	5
Succès en pourcentage (avec + ou moins 1 classe)	-	-	80	96,3	96,3	100

	Groupe de texture de l'horizon B						
	0	1	2	3	4	5	6
Succès en pourcentage (avec + ou moins 1 classe)	-	25	37,5	88,9	82,3	66,7	84,2

	Classes de drainage	
	5	6
Succès en pourcentage (avec + ou moins 1 classe)	100	100



Volet Agronomique
Évaluer la faisabilité de la gestion localisée

OBJECTIF

Est-ce que la gestion de la variabilité des sols est pertinente, gérable et rentable à l'échelle de la ferme?

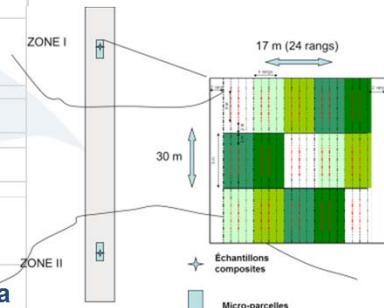
APPROCHE

- Réseau d'étude en parcelles expérimentales;
- Effet "Sol" à l'étude, comparant deux zones d'étude à l'intérieur du même champ, sous régie identique;
- Dispositif ciblé sur la réponse à l'azote.



Volet Agronomique *Dispositif expérimental*

* Deux saisons: 2012 et 2013
* Trois régions: Bassins Baie Lavalière, Baie Missisquoi et Rivière Esturgeon
* Cinq champs par région/an
* Deux zones/Champ
15 micro-parcelles par zone
* Courbes de réponse au N: - 5 Traitements: 0,50, 100, 150, 200 kg N/ha - Trois blocs de répétition
* Total: 900 microparcelles sur 60 sites



irda

Volet Agronomique *Protocoles de mesure*

Période de post-levée

Sols- Fertilité

P, K, Ca, Mg, Mineurs 0-20 cm
Nitrates 0-30 cm

Période de récolte

Cultures de maïs

Rendements Grain, toutes parcelles
Biomasses et prélèvements N en
Parcelles témoin

Sols-Propriétés physiques

(Cylindres 0 -20 et 20-40 cm)

Masse volumique apparente
Macroporosité (100 cm de tension)
Conductivité hydraulique saturée

Sols- Fertilité

Nitrates résiduels 0-60cm



Fertilisation azotée des parcelles en période de post-levée



Prélèvement de cylindres de sol non dérangé en période de récoltes

irda

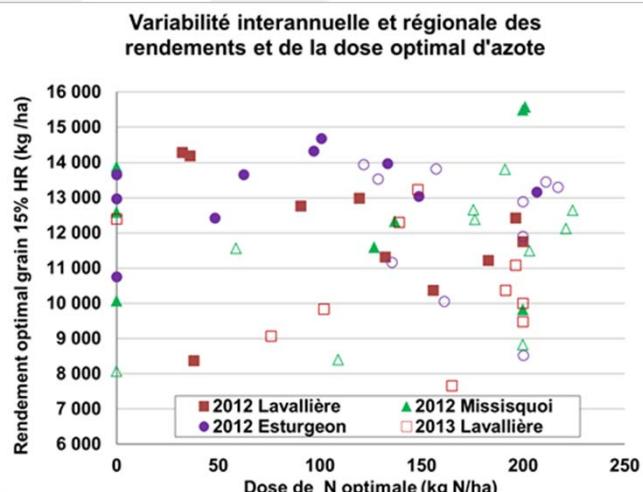
Volet agronomique
Conditions agrométéorologiques 2012 et 2013

Précipitations et cumul des degrés jours au cours des saisons de croissance 2012 et 2013 pour les trois régions à l'étude

Année	Région	Station météo	Période du semis à la post-levée		Période de post-levée à la récolte	
			Précipitation cumulée (mm)	Degrés-jours cumulés	Précipitation cumulée (mm)	Degrés-jours cumulés
2012	Baie Lavallière	Sorel	158	292	347	1168
2012	Baie Missisquoi	Farnham	153	288	367	1074
2012	Esturgeon	Sainte-Martine	156	302	328	1126
2013	Baie Lavallière	Sorel	207	272	435	1033
2013	Baie Missisquoi	Farnham	274	273	453	991
2013	Esturgeon	Sainte-Martine	203	272	359	1001



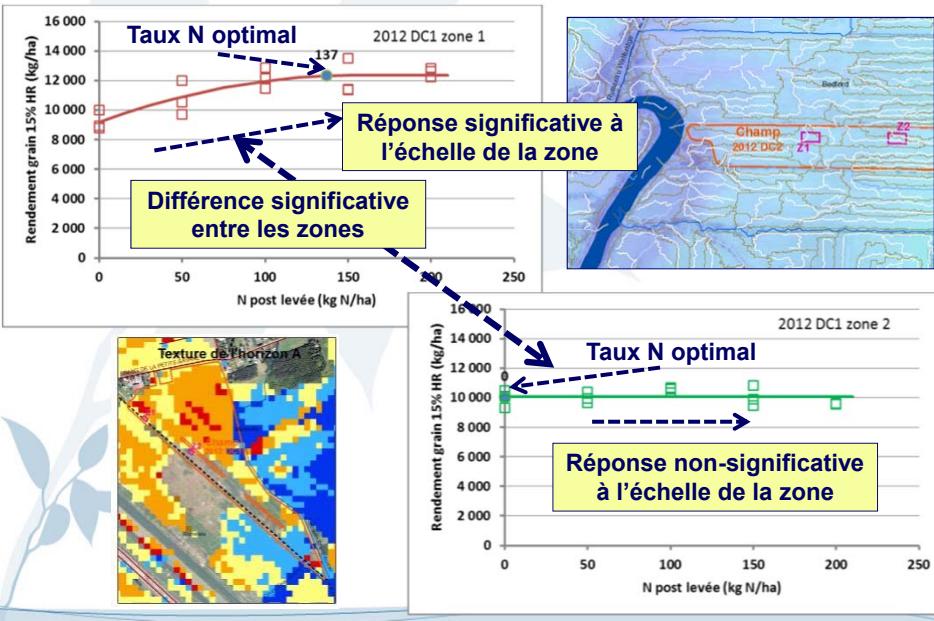
Volet agronomique
Rendements vs Dose optimale de N



Pas de lien entre le rendement optimum et la dose optimale de N:

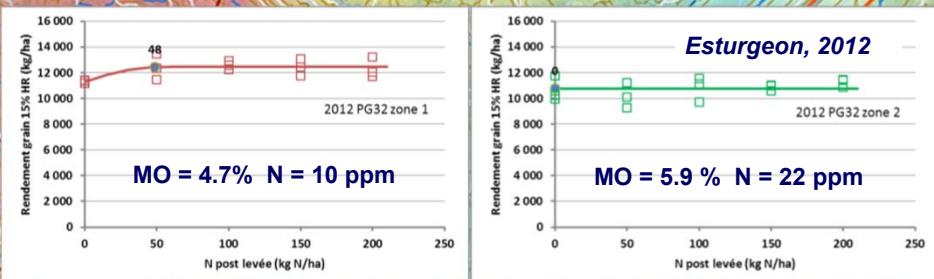
- Variabilité de N disponible dans le sol;
- Variabilité de la réponse de la culture au N apporté.

Volet Agronomique
Interpréter les courbes de réponse au N



Volet Agronomique
Interpréter les courbes de réponse au N

Absence de réponse significative à l'azote: 26/59 parcelles



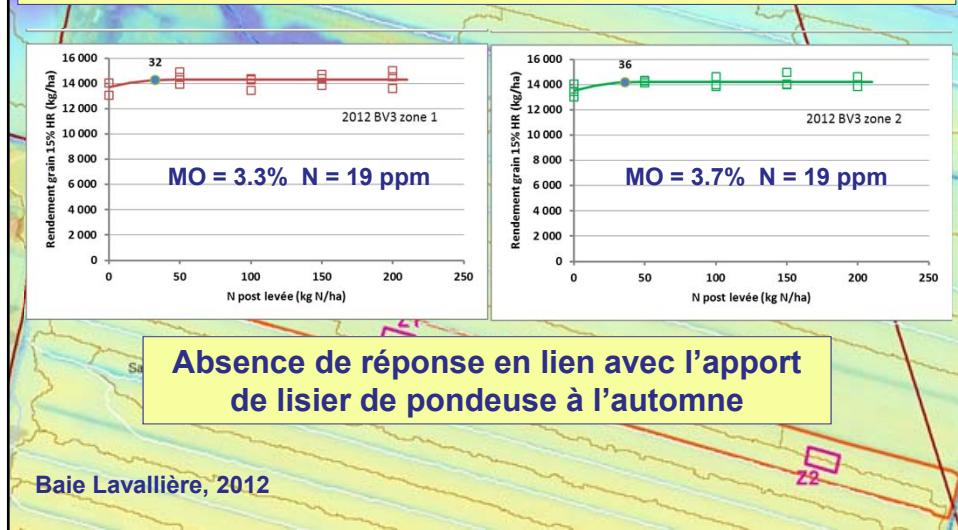
En lien avec la fourniture d'azote du sol (9/26 parcelles):

- Taux élevé de matière organique
- Apport automnal d'engrais de ferme
- Arrières effets d'engrais de ferme

Volet Agronomique

Interpréter les courbes de réponse au N

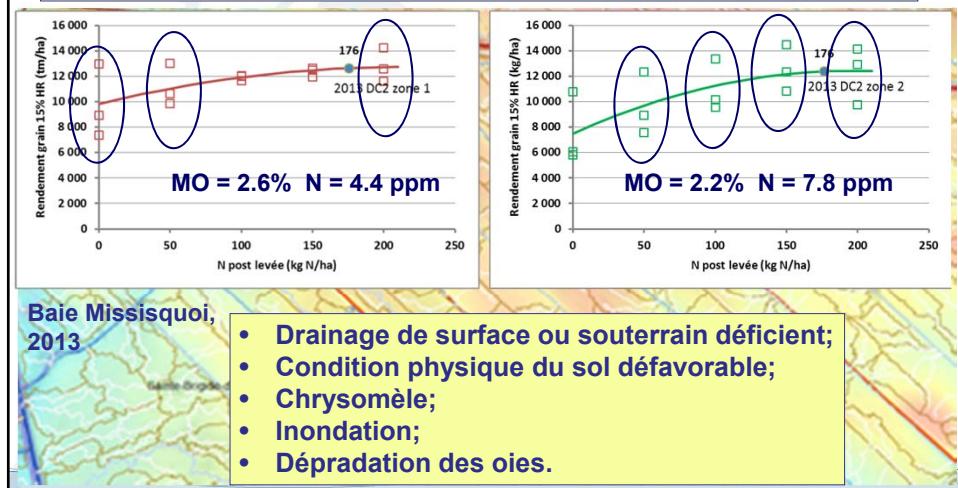
Absence de réponse significative à l'azote en lien avec la fourniture du sol: 9/26 parcelles



Volet Agronomique

Interpréter les courbes de réponse au N

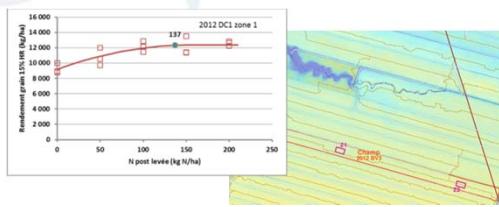
Absence de réponse significative à l'azote en lien avec une forte variabilité spatiale intra-zone du rendement: 17/26 parcelles



Volet Agronomique Doses optimales d'apport d'azote

Dans l'ensemble, sur la base d'un taux d'apport de N de référence de 150 kg N/ha en post-levée:

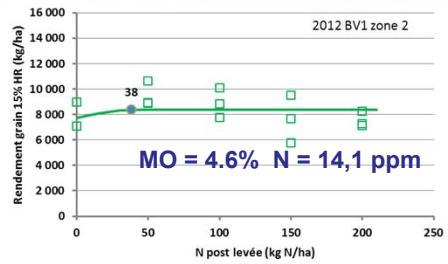
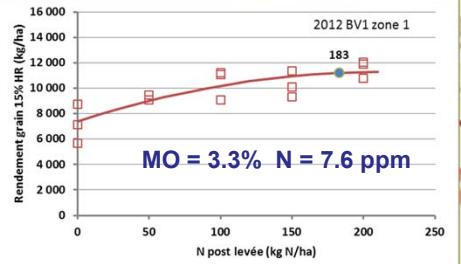
- Des réductions des apports de N sont justifiées pour 16 des 29 champs à l'étude (55%), équivalent à un taux optimal moyen de 84 kg N/ha.
- Pour 3 champs/16 (19%), la modulation inter-zone de l'apport de N n'est pas justifiée. Les taux optimaux sont respectivement établis à: 0, 37 et 109 kg/N/ha.
- Pour 13 champs/16 (81%), la modulation inter-zone des apports de N est justifiée. Le taux optimal moyen de N en post-levée de 88 kg N/ha.



irda

Volet Agronomique Doses optimales d'apport d'azote

**Modulation inter-zone des apports de N justifiée
13 champs/16 à taux réduit**



**Baie Lavallière, 2012
80% sable**

Volet Agronomique
**Rendements et doses optimales de N
 vs Propriétés des sols**

	Rendement témoin (0N)	Rendement au Nop	Dose N optimale
Rendement témoin (0N)		0.56***	-0.71***
Rendement au Nop	0.56***		ns
N optimal	-0.71***	ns	
Teneur en nitrates (post-levée)	0.61***	0.32*	-0.54***
Teneur en sable	ns	ns	ns
Teneur en argile	ns	ns	ns
Taux de matière organique	0.36**	0.26*	ns
Teneur en N total	0.37**	0.27*	-0.25*
Indice de saturation en P	ns	0.29*	ns
Teneur en Mehlich K	ns	0.37**	ns

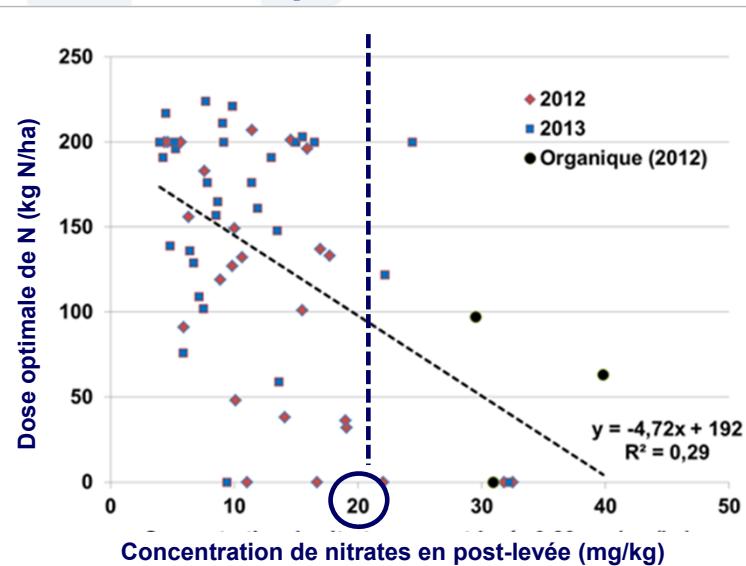
La teneur en N du sol: un indicateur de la dose optimale en post-levée.

Densité apparente (20-40 cm) -0.58 ns ns

*, **, ***: Respectivement significatifs au seuils de 0.5, 0.01 et 0.001.



Volet Agronomique
**Rendements et doses optimales de N
 vs Propriétés des sols**



Volet Agronomique
**Rendements et doses optimales de N
 vs Propriétés des sols**

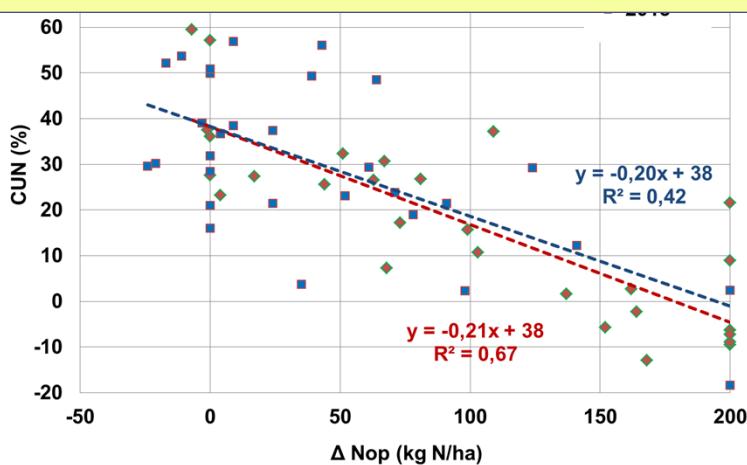
	Rendement témoin (ON)	Rendement au Nop	Dose N optimale
Rendement témoin (ON)		0.56***	-0.71***
Rendement au Nop	0.56***		ns
N optimal	-0.71***	ns	
Teneur en nitrates (post-levée)	0.61***	0.32*	-0.54***
Teneur en sable	ns	ns	ns
Teneur en argile	ns	ns	ns
Taux de matière organique	0.36**	0.26*	ns
Teneur en N total	0.37**	0.27*	-0.25*
Indice de saturation en P	ns	0.29*	ns

Le taux de MOS: un indicateur du stock d'azote disponible.
 Corrélation significative observées entre le taux de nitrates en post-levée et le taux de MOS ($r=0,62***$) et de N total du sol ($r=0,63**$).

, **, *: Respectivement significatifs au seuils de 0.5, 0.01 et 0.001.*

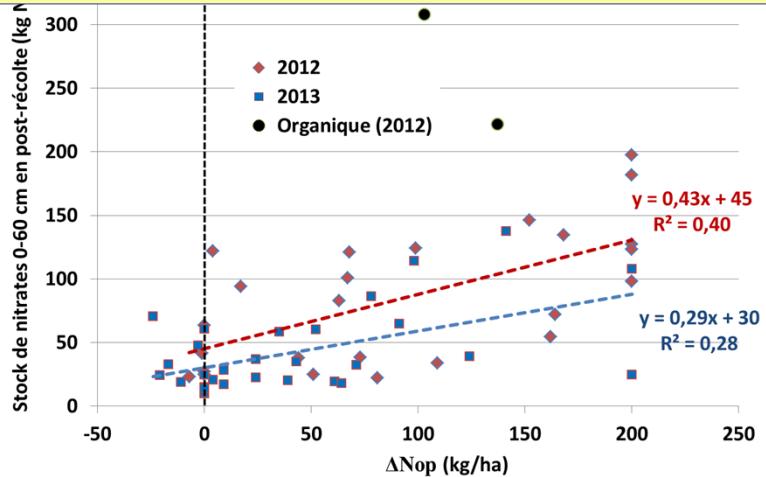
Volet Agronomique
Efficacité de l'azote

L'écart entre la dose totale de N appliquée et la dose économique de N (Δ Nop) est un bon indicateur l'efficacité de l'utilisation de l'azote.



Volet Agronomique
Nitrates résiduels vs surfertilisation (ΔNop)

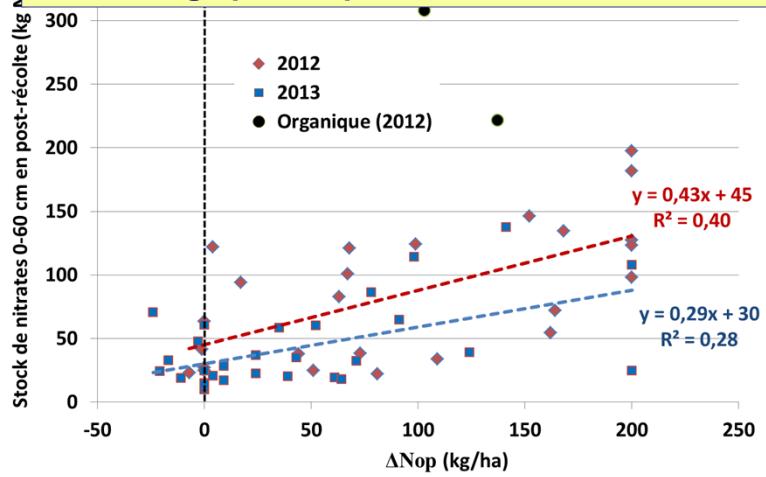
L'apport de N en post-levée au-dessus du niveau de fertilisation optimal se traduit en accumulation proportionnelle de nitrates inutilisés en fin de saison.



irda

Volet Agronomique
Nitrates résiduels vs surfertilisation (ΔNop)

- Taux de NRS plus élevés en 2012 qu'en 2013;
- Effet de la forte pluviosité de l'été 2013,
- Lessivage plus important des nitrates.



irda

Volet Agronomique
Nitrates résiduels vs propriétés du sol

	Teneur en nitrates en post-levée	Teneur en nitrates résiduels Témoin (0N)	Teneur en nitrates résiduels 150 N
Teneur en nitrates (post-levée)		0,67***	0,69***
Nitrates résiduels Témoin	0,67***		0,75***
Nitrates résiduels 150 N	0,69***	0,75***	
ΔNopt (150N)	0,54***	0,53***	0,60***
Rendement au Nopt	0,32*	ns	ns
Teneur en sable	ns	ns	ns
Teneur en argile	ns	ns	ns
Taux de matière organique	0,62***	0,52***	0,68***
Teneur en N total	0,63***	0,50***	0,69***

**Corrélations MOS, N total du sol, Nitrates en post-levée,
Avec NRS des parcelles témoin ou fertilisées au taux de
référence de 150 N en post-levée:**

*Prendre en compte la minéralisation de la matière
organique en cours de saison de croissance dans la
formulation des recommandations de fertilisation azotée.*

Volet Agronomique
Nitrates résiduels vs propriétés du sol

	Teneur en nitrates en post-levée	Teneur en nitrates résiduels Témoin (0N)	Teneur en nitrates résiduels 150 N
Teneur en nitrates (post-levée)	0,67***	0,69***	

**Corrélations entre N post-levée et NRS avec les indicateurs
des propriétés structurales du sol en 2012:**

*Indication de l'influence des propriétés physiques sur la
minéralisation du N en cours de saison.*

(Hypothèse à valider sur les cylindres de sol prélevés en 2013).

Taux de matière organique	0,62***	0,52***	0,68***
Teneur en N total	0,63***	0,50***	0,69***
Densité apparente (0-20cm)	-0,74***	-0,54**	-0,71***
Macroporosité 100 cm (0-20cm)	0,38*	ns	0,54**
Conductivité hydraulique (20-40 cm)	ns	ns	0,39*
Densité apparente (20-40 cm)	-0,50**	-0,51**	-0,60***
Macroporosité 100 cm (20-40 cm)	ns	ns	ns
Conductivité hydraulique (20-40 cm)	ns	ns	0,53**

* , ** , ***: Respectivement significatifs au seuils de 0.5, 0.01 et 0.001.



Volet Agronomique
Nitrates résiduels vs propriétés du sol

	Teneur en nitrates en post-levée	Teneur en nitrates résiduels Témoin (0N)	Teneur en nitrates résiduels 150 N
Teneur en nitrates (post-levée)		0,67***	0,69***
Nitrates résiduels Témoin	0,67***		0,75***
Nitrates résiduels 150 N	0,69***	0,75***	
ΔNopt (150N)	0,54***	0,53***	0,60***
Rendement au Nopt	0,32*	ns	ns
Teneur en sable	ns	ns	ns

Taux de nitrates en post-levée corrélé avec le rendement optimal, et Rendement optimal non corrélé avec NRS:
Indication de complémentarité entre les objectifs de rendement économique et environnementaux.

Densité apparente (20-40 cm)	-0,50**	-0,51**	-0,60***
Macroporosité 100 cm (20-40 cm)	ns	ns	ns
Conductivité hydraulique (20-40 cm)	ns	ns	0,53**

* , ** , ***. Respectivement significatifs au seuils de 0.5, 0.01 et 0.001.



Volet Environnemental
Projeter les bénéfices environnementaux
OBJECTIF

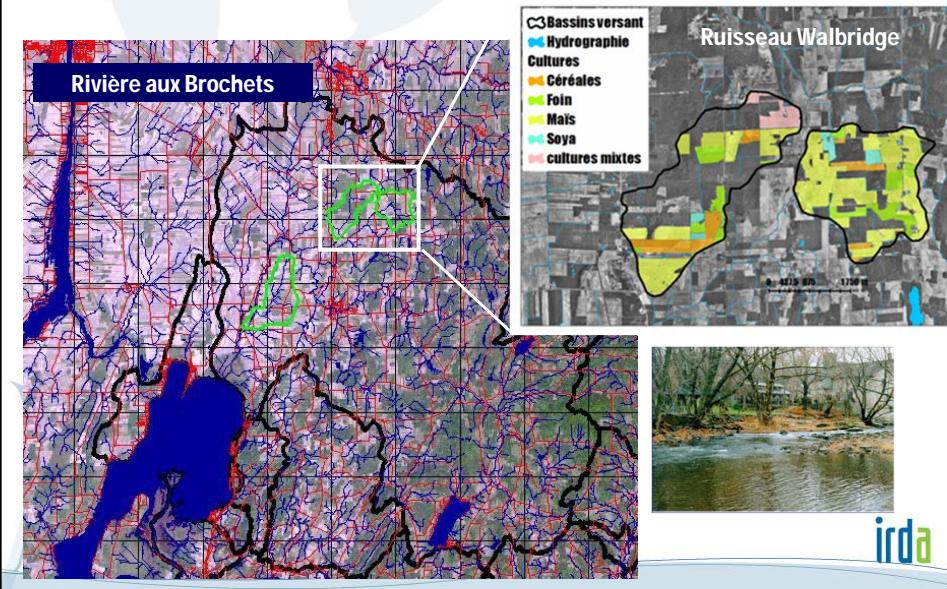
Quels sont les bénéfices anticipés de la gestion localisée des champs au plan de la qualité de l'eau ?

APPROCHE

- **Suivis hydrologiques en bassins versants expérimentaux (6-8 km², rivière aux Brochets)**
- **Calage et validation du modèle hydrologique SWAT-Qc**
- **Prédiction des pertes de N suivant différents scénarios de régie**

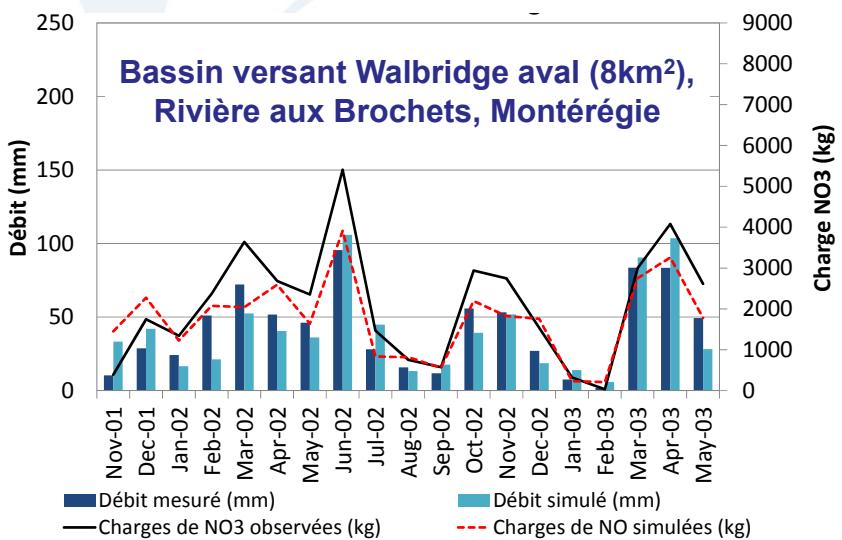


Volet Environnemental Projeter les bénéfices environnementaux



Volet Environnemental Projeter les bénéfices environnementaux

Débits et charges de nitrates mensuels



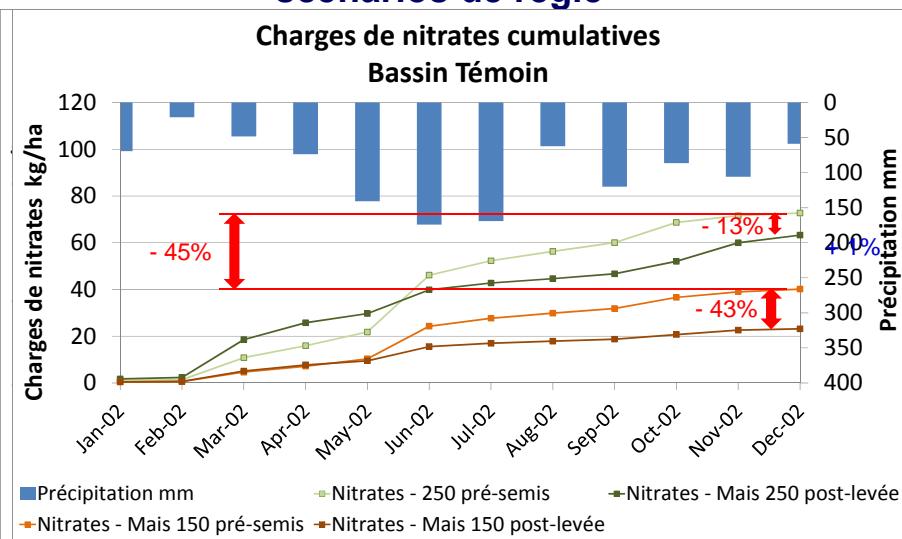
Volet Environnemental
Projeter les bénéfices environnementaux

Charges annuelles de nitrates

Année	Flux NO ₃ mesurés (kg et kg/ha)	Flux NO ₃ % mai-juin mesurés
2002 – normale	27,809 T 35 kg/ha	28%
2005 – sèche	19, 4 T 24 kg/ha	15%
2006 – humide sans nov. et déc.	16,9 T 21 kg/ha	48%



Volet Environnemental
Projeter les bénéfices environnementaux
Charges cumulatives de nitrates selon les scénarios de régie



Conclusions

- 1. Faisabilité de l'approche de télédétection d'appuyer la reconnaissance de la variabilité intra-parcellaire des propriétés des propriétés des sols ?**
- 2. Potentiel de réduction de la fertilisation azoté sur la moitié des champs: Dose optimale taux optimum de 84 kg N/ha en post-levée.**
- 3. Bénéfices anticipés de la gestion localisée des champs au plan de la qualité de l'eau.**

