



# PCAA

## Programme canadien d'adaptation agricole

### *Rapport final*

REZOTAGE : Réalisation de ZOnes Technico-économiques Agricoles de Gestion

No de projet 6628

IRDA

Janvier 2012 à décembre 2013

Rédigé par

Aubert Michaud, chercheur  
Ariane Drouin, professionnelle de recherche  
Isabelle Beaudin, professionnelle de recherche  
Luc Belzile, chercheur  
Marc-Olivier Gasser, chercheur  
Jacques Desjardins, technicien agricole  
Noémi Côté, technicienne agricole

Collaborateurs :

Jean-Daniel Sylvain, Direction de la recherche forestière, MRNF  
Benoît Laferrière et l'équipe du Club agroenvironnemental La Vallière inc.  
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  
Entreprises agricoles participantes

23 septembre 2014

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) s'est engagé à travailler avec des partenaires de l'industrie. Les opinions exprimées dans le présent document sont celles du demandeur et ne sont pas nécessairement partagées par AAC et le CDAQ.

**Préparé par :**

Aubert Michaud, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)  
Ariane Drouin, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)  
Isabelle Beaudin, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)  
Luc Belzile, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)  
Marc-Olivier Gasser, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)  
Jacques Desjardins, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)  
Noémi Côté, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

**Collaborations scientifiques :**

Jean-Daniel Sylvain, Direction de la recherche forestière, MRNF  
Benoît Laferrière et l'équipe du Club agroenvironnemental La Vallière inc.  
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  
Entreprises agricoles participantes

**Le rapport peut être cité comme suit :**

Michaud, A.R., A. Drouin, I. Beaudin, L. Belzile, M.-O. Gasser, J. Desjardins et N. Côté. 2014. REZOTAGE : Réalisation de ZONES Technico-économiques Agricoles de Gestion. Rapport final. Projet réalisé dans le cadre du Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA) en collaboration avec le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada, 181 pp.

**Remerciements**

Cette étude a été rendue possible grâce à la participation financière du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec et d'Agriculture et Agroalimentaire Canada dans le cadre du Programme canadien d'adaptation agricole. Les auteurs tiennent donc à remercier ces organismes pour le financement accordé. Les auteurs souhaitent également remercier tous les collaborateurs du projet pour leur travail colossal ainsi que les producteurs agricoles qui ont mis leurs terres à la disposition du projet.

# Table des matières

Liste des tableaux .....	6
Liste des figures.....	10
<b>1. OBJECTIFS</b> .....	12
<b>1.1. Objectif général</b> .....	12
<b>1.2. Objectifs spécifiques</b> .....	12
<b>2. RÉSULTATS ET ANALYSE</b> .....	13
<b>2.1. Résultats obtenus et analyse</b> .....	13
<b>2.1.1. Volet télédétection</b> .....	13
2.1.1.1. Acquisition des images.....	15
2.1.1.2. Cartographie des sols nus .....	18
2.1.1.3. Calcul et cartographie des indices spectraux .....	19
2.1.1.4. Traitement des données d'élévation et production de dérivés.....	23
2.1.1.5. Mise en forme des données pédologiques .....	24
2.1.1.6. Prédiction et cartographie des propriétés des sols .....	27
2.1.1.6.1. Résultats de prédiction dans la région de Missisquoi.....	29
2.1.1.6.2. Résultats de prédiction dans la région de l'Esturgeon.....	40
2.1.1.6.3. Résultats de prédiction dans la région de la Baie Lavallière .....	51
<b>2.1.2. Volet agronomique</b> .....	67
2.1.2.1. Dispositif expérimental .....	67
2.1.2.2. Propriétés physico-chimiques des sols .....	70
2.1.2.3. Rendements et courbes de réponse à l'azote .....	75
2.1.2.4. Efficacité de l'utilisation de l'azote et des nitrates résiduels.....	87
2.1.2.5. Variabilité intraparcellaire et pertinence de la gestion localisée .....	90
<b>2.1.3. Volet économique</b> .....	93
2.1.3.1. Approche méthodologique .....	93
2.1.3.2. Résultats .....	94
<b>2.1.4. Volet hydrologique</b> .....	96
2.1.4.1. Description des sites expérimentaux .....	96
2.1.4.2. Mesures de terrain et traitement des données.....	98
2.1.4.3. Description du modèle SWAT .....	99
2.1.4.3.1. Composantes hydrologiques.....	100
2.1.4.3.2. Composantes du cycle terrestre de l'azote .....	100
2.1.4.4. Étape de mise en place du modèle.....	101
2.1.4.5. Paramétrage du modèle pour les bassins à l'étude .....	102
2.1.4.5.1. Attributs du paysage .....	102
2.1.4.5.2. Données météorologiques .....	103
2.1.4.5.3. Croissance des cultures.....	103
2.1.4.5.4. Richesse du sol en P et en N.....	103
2.1.4.5.5. Systèmes culturaux et fertilisation du scénario de calage .....	103
2.1.4.6. Description des scénarios modélisés .....	104
2.1.4.6.1. Scénarios de fertilisation .....	104
2.1.4.7. Résultats .....	105
2.1.4.7.1. Calage et validation .....	105
2.1.4.7.2. Scénarios de fertilisation .....	108

Références citées .....	114
<b>2.2. Diffusion des résultats .....</b>	<b>117</b>
<b>3. CONCLUSIONS .....</b>	<b>121</b>
<b>4. SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET .....</b>	<b>124</b>
<b>5. PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES .....</b>	<b>126</b>
<b>6. ANNEXES .....</b>	<b>127</b>
<b>Annexe 1 : Cartographie haute résolution (1:5 000) du parcellaire .....</b>	<b>127</b>
Secteur de la Baie Lavallière .....	128
Secteur Missisquoi / Montérégie-Est.....	140
Secteur de l'Esturgeon / Montérégie- Ouest.....	150
<b>Annexe 3 : Paramètres de calage de SWAT .....</b>	<b>177</b>
Paramètres de calages de SWAT.....	177
<b>Annexe 4 : Données météorologiques.....</b>	<b>180</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1. Précipitations moyennes (en mm) aux stations météorologiques d'Environnement Canada de Sainte-Martine (région Esturgeon), Sabrevois (région Missisquoi) et Sorel (région Lavallière). .....	18
Tableau 2. Indices spectraux utilisés dans le cadre du projet ReZoTaGe.....	20
Tableau 3. Description des groupes de texture des horizons A et B. ....	28
Tableau 4. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée). .....	30
Tableau 5. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).....	30
Tableau 6. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).....	30
Tableau 7. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée). .....	33
Tableau 8. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).....	33
Tableau 9. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).....	33
Tableau 10. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée). .....	36
Tableau 11. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective du producteur) pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).....	36
Tableau 12. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective de l'utilisateur) pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).....	36
Tableau 13. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification manuelle). ....	38
Tableau 14. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée). ....	38
Tableau 15. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification manuelle). ....	39
Tableau 16. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée). ....	39
Tableau 17. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification manuelle). .....	39
Tableau 18. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée). .....	40
Tableau 19. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	40

Tableau 20. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	40
Tableau 21. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	41
Tableau 22. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	44
Tableau 23. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	44
Tableau 24. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	45
Tableau 25. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	48
Tableau 26. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective du producteur) pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	48
Tableau 27. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective de l'utilisateur) pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	48
Tableau 28. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification manuelle). .....	50
Tableau 29. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	50
Tableau 30. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification manuelle). .....	50
Tableau 31. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	51
Tableau 32. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification manuelle). .....	51
Tableau 33. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée). .....	51
Tableau 34. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	52
Tableau 35. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	52
Tableau 36. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	52
Tableau 37. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	55
Tableau 38. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	55
Tableau 39. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	55
Tableau 40. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	58

Tableau 41. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective du producteur) pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	58
Tableau 42. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective de l'utilisateur) pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	58
Tableau 43. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification manuelle). .....	60
Tableau 44. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	60
Tableau 45. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification manuelle). .....	60
Tableau 46. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	61
Tableau 47. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification manuelle). .....	61
Tableau 48. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la baie Lavallière (résultats de la classification automatisée). .....	61
Tableau 49. Textures de l'horizon A prédites et analysées pour les parcelles à l'étude des régions de Missisquoi, de l'Esturgeon et de la Baie Lavallière .....	62
Tableau 50. Précipitations et cumul des degrés jours au cours des saisons de croissance 2012 et 2013 pour les trois régions à l'étude.....	68
Tableau 51. Description des sites expérimentaux du bassin versant Lavallière.....	71
Tableau 52. Description des sites du bassin versant de la Baie Missisquoi.....	72
Tableau 53. Description des sites du bassin versant de l'Esturgeon.....	72
Tableau 54. Estimations moyennes et écarts-type des propriétés physico-chimiques des sols par région d'étude. ....	74
Tableau 55. Corrélations linéaires paramétriques de Pearson entre les propriétés des sols des sites expérimentaux.....	74
Tableau 56. Moyennes et coefficients de variation du rendement et de la dose optimale par saison de croissance et région d'étude. ....	76
Tableau 57. Rendements et prélèvements N de la parcelle témoin (0 N en post-levée), rendement économique, dose optimale d'azote et valeurs F associées aux modèles de régression de rendement sur la dose de N appliquée en post-levée pour la saison de croissance 2012.....	78
Tableau 58. Rendements et prélèvements N de la parcelle témoin (0 N en post-levée), rendement économique, dose optimale d'azote et valeurs F associées aux modèles de régression de rendement sur la dose de N appliquée en post-levée pour la saison de croissance 2013.....	79
Tableau 59. Corrélations linéaires paramétriques de Pearson entre les rendements des parcelles témoin, les rendements optimaux et les doses optimales de N et les propriétés des sols. (N=59). .....	86
Tableau 60. Corrélations linéaires paramétriques de Pearson entre les teneurs en nitrates en post-levées et en post-récoltes observées dans les parcelles témoin (0 N en post-levée) et fertilisées au taux de référence de de 150 N en post-levée.....	90
Tableau 61. Détection de différences significatives dans les doses optimales d'azote entre les zones du même champ pour l'ensemble des sites à l'étude.....	92
Tableau 62. Frais d'exploitation de la géolocalisation.....	94
Tableau 63. Budget partiel au solde nul pour une réduction de fertilisation azotée de 37 \$/ha. ..	95
Tableau 64. Caractéristiques générales des bassins versants Walbridge amont et aval. ....	98
Tableau 65. Représentativité des groupes hydrologiques des bassins Walbridge Intervention et Témoin.....	98
Tableau 66. Groupes hydrologiques et caractéristiques des sols.....	102

Tableau 67. Description des scénarios de fertilisation.....	104
Tableau 68. Résultats de calage et de validation des débits quotidiens des bassins versants Walbridge Intervention (4) et Témoin (5).....	105
Tableau 69. Débits et charges de nitrates mensuels mesurés du bassin amont pour les années 2002, 2005 et 2006.....	107
Tableau 70. Débits et charges de nitrates mensuels mesurés du bassin aval pour les années 2002, 2005 et 2006.....	107
Tableau 71. Résultats mensuels de calage (Nov. 2001 à mai 2003) et de validation (Nov. 2004 à oct. 2006) des exportations de nitrates des bassins Walbridge Témoin et Intervention.....	107
Tableau 72. Charges annuelles simulées de nitrates exportées des bassins Walbridge Amont et Aval pour les années 2005 et 2006.....	109
Tableau 73. Comparaison des hauteurs d'eau et des charges de nitrates d'une URH en culture de maïs sur un sol bien drainé (Shefford loam graveleux) et une URH en culture de maïs sur un sol mal drainé (Milton loam sableux).....	112

## Liste des figures

Figure 1. Localisation des trois zones d'étude du projet ReZoTaGe. ....	16
Figure 2. Superficies couvertes par les images satellitaires Landsat. ....	17
Figure 3. Sols nus (en bleu) de la région de l'Esturgeon : a) image du 10 juin 1987, b) image du 8 juin 2001, et c) image du 10 mai 2009. ....	19
Figure 4. Indice de brillance (IB) des sols de la région de l'Esturgeon pour a) une image «humide» (10 juin 1987), et b) une image «sèche» (21 avril 1998). ....	21
Figure 5. Indice de brillance normalisé corrigé (IBNc) des sols de la région de l'Esturgeon pour a) une image «humide» (10 juin 1987), et b) une image «sèche» (21 avril 1998). ....	21
Figure 6. IBN, ICOM, IBNc dérivés de l'image Landsat du 21 avril 1998 (image en conditions sèches) pour deux zones distinctes du bassin versant de l'Esturgeon (a et b). ....	22
Figure 7. Organigramme de LandMapR (source : I. Beaudin et G. Laflamme, 2005) .....	23
Figure 8. Modèle numérique d'élévation (MNE) LiDAR et position dans le paysage de la zone d'étude de la Baie Lavallière. ....	24
Figure 9. Profils de sols d'AAC de la zone de la Baie Lavallière (Source : Isabelle Perron, AAC, 2012). ....	25
Figure 10. Profils de sols d'AAC de la zone de l'Esturgeon (Source : Isabelle Perron, AAC, 2012). ....	26
Figure 11. Profils de sols d'AAC de la zone de Missisquoi (Source : Isabelle Perron, AAC, 2012). ....	27
Figure 12. Cartographie des groupes de texture de l'horizon A pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle). ....	31
Figure 13. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon A pour la région de Missisquoi. ....	32
Figure 14. Cartographie des groupes de texture de l'horizon B pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle). ....	34
Figure 15. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon B pour la région de Missisquoi. ....	35
Figure 16. Cartographie des classes de drainage pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle). ....	37
Figure 17. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des classes de drainage pour la région de Missisquoi. ....	37
Figure 18. Cartographie des groupes de texture de l'horizon A pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle). ....	42
Figure 19. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon A pour la région de l'Esturgeon. ....	43
Figure 20. Cartographie des groupes de texture de l'horizon B pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle). ....	46
Figure 21. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon B pour la région de l'Esturgeon. ....	47
Figure 22. Cartographie des classes de drainage pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle). ....	49
Figure 23. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des classes de drainage pour la région de l'Esturgeon. ....	49
Figure 24. Cartographie des groupes de texture de l'horizon A pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle). ....	53
Figure 25. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon A pour la région de la Baie Lavallière. ....	54
Figure 26. Cartographie des groupes de texture de l'horizon B pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle). ....	56
Figure 27. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon B pour la région de la Baie Lavallière. ....	57
Figure 28. Cartographie des classes de drainage pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle). ....	59

Figure 29. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des classes de drainage pour la région de la Baie Lavallière.....	59
Figure 30. Précipitations et cumul des degrés jours au cours des saisons de croissance 2012 et 2013 pour les trois régions à l'étude.....	68
Figure 31. Dispositif expérimental intra-parcellaire mis en œuvre dans le cadre du projet REZOTAGE.....	69
Figure 32. Variabilité interannuelle et régionale des rendements optimaux et des doses optimales d'azote.....	75
Figure 33. Variabilité dans l'ajustement des modèles de prédiction de la dose optimale d'azote.....	76
Figure 34. Courbes de réponse à l'azote pour la région de la Baie Lavallière en 2012.....	80
Figure 35. Courbes de réponse à l'azote pour la région de la Baie Missisquoi en 2012.....	81
Figure 36. Courbes de réponse à l'azote pour la région de l'Esturgeon en 2012.....	82
Figure 37. Courbes de réponse à l'azote pour la région de la Baie Lavallière en 2013.....	83
Figure 38. Courbes de réponse à l'azote pour la région de la Baie Missisquoi en 2013.....	84
Figure 39. Courbes de réponse à l'azote pour la région de l'Esturgeon en 2013.....	85
Figure 40. Relation entre la concentration de nitrates en post-levée et la dose optimale de N....	87
Figure 41. Relation entre le coefficient de l'utilisation de l'azote (CUN) et l'écart entre la dose de N appliquée (150 N) et la dose économique optimale ( $\Delta$ Nop).....	88
Figure 42. Relation entre le taux de nitrates en post-récolte et l'écart entre la dose totale de N appliquée (démarrateur + post-levée) et la dose économique optimale ( $\Delta$ Nop).....	89
Figure 43. Localisation des bassins d'études du ruisseau Walbridge.....	97
Figure 44. Élévation des bassins d'études du ruisseau Walbridge.....	97
Figure 45. Représentation spatiale des unités de réponse hydrologique (URH) pour le bassin versant de la rivière aux Brochets.....	99
Figure 46. Composantes du cycle terrestre de l'azote modélisé par SWAT.....	101
Figure 47. Débits quotidiens mesuré et simulé du bassin Walbridge Témoin pour la période de calage (novembre 2011 à mai 2003).....	106
Figure 48. Débit et charges de nitrates mensuels observés et simulés des bassins Intervention et Témoin durant la période de calage.....	108
Figure 49. Débit et charges de nitrates mensuels observés et simulés des bassins Intervention et Témoin durant la période de validation.....	108
Figure 50. Exportations des charges de nitrates mensuelles du bassin amont en 2005 et 2006.....	110
Figure 51. Exportations des charges de nitrates mensuelles du bassin aval en 2005 et 2006.....	110
Figure 52. Provenance des charges de nitrates quotidiennes d'une URH représentant une culture de maïs sur un sol bien drainé (Shefford loam graveleux) en 2003 et 2004 (hauteurs de précipitations dans les normales).....	112

# 1. OBJECTIFS

---

## 1.1. Objectif général

La réalisation du projet ReZoTaGe visait à compléter la gamme d'outils à référence spatiale mis à la disposition des conseillers et producteurs agricoles en support à la prise en compte de la variabilité spatiale des propriétés des sols dans la prestation de services conseils et la régulation des sols et des cultures. Cette initiative de recherche appliquée résultait de deux principaux constats. D'une part, 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 régulation des champs. D'autre part, les suivis hydrologiques réalisés en petits bassins versants en Montérégie, au Québec, mettent en relief des pertes en azote particulièrement élevées, atteignant plus de 60 kg N/ha en moyenne sur certains bassins dominés par la culture du maïs-grain (Michaud et al., 2009; 2012).

Reflétant les préoccupations des trois équipes de services-conseils partenaires au projet, le projet REZOTAGE s'est centré sur le thème de la gestion localisée de la fertilisation azotée du maïs suivant une approche de recherche à la ferme. La démarche du projet a consisté à évaluer si une approche de gestion localisée du parcellaire, appuyée par la reconnaissance de la variabilité des propriétés des sols à l'échelle des champs, permettait de mieux cerner les besoins en fertilisation azotée et ainsi concilier des gains en termes de rendement économique du maïs-grain, avec une atténuation des pertes d'azote vers le cours d'eau. La réalisation du projet est basée sur une démarche multi-disciplinaire, mettant à profit l'intégration d'avancées scientifiques récentes à l'IRDA en matière de reconnaissance de la variabilité spatiale des sols par télédétection (Sylvain, 2011; Sylvain et al., 2012), de la validation d'indicateurs agronomiques et environnementaux du devenir de l'azote (N'Dayegamiye et al., 2009; Giroux et al., 2009) et enfin du suivi et de la modélisation hydrologique des pertes d'azote à l'exutoire de petits bassins versants exploités en grandes cultures (Michaud et al., 2007; 2008).

## 1.2. Objectifs spécifiques

Dans un cadre décisionnel à la ferme, la mise en œuvre d'une approche de gestion localisée comporte plusieurs étapes :

- En premier lieu par, la reconnaissance de propriétés contrastantes de sol à l'échelle du champ et de la ferme.
- En seconde étape, par la vérification que le gradient spatial dans les propriétés du sol justifie bel et bien une régulation distincte des zones de gestion.
- Enfin, par la validation, au plan économique, que la réduction du coût de production associée à la gestion localisée justifie l'augmentation des coûts liée à sa mise en œuvre.

En réponse à ces trois objectifs opérationnels, le projet REZOTAGE s'est déployé autour de différents volets d'étude, respectivement à portée géomatique, agronomique et économique. Un quatrième volet, à portée hydrologique, complète l'étude, projetant les résultats du volet agronomique à l'échelle parcellaire en retombées environnementales à l'échelle du bassin versant. L'ensemble des volets d'étude répondent ainsi aux objectifs spécifiques suivants :

- Valider une méthode de représentation spatiale des propriétés du sol (relief, texture, drainage et taux de matière organique) dans trois régions distinctes à partir de modèles numériques d'élévation et d'images satellitaires multispectrales généralement disponibles pour l'ensemble du parcellaire en culture au Québec;

- Développer un outil informatique convivial et libre (open source) en support à la représentation de la variabilité spatiale des propriétés stables des sols de façon à favoriser l'accessibilité à la gestion intégrée et localisée du parcellaire auprès de l'ensemble des conseillers et producteurs agricoles du Québec et du Canada;
- Évaluer au niveau technique et économique la pertinence, le coût et les avantages associés à la gestion localisée de la fertilisation azotée supportée par la télédétection.
- Évaluer les retombées de scénarios de gestion localisée de l'azote sur les pertes de nitrates vers les cours d'eau, suivant une approche de modélisation hydrologique appliquée sur deux bassins versants de la Montérégie.

## **2. RÉSULTATS ET ANALYSE**

---

### **2.1. Résultats obtenus et analyse**

Cette section du rapport scientifique présente successivement les méthodologies et résultats des quatre volets du projet ReZoTaGe, relatifs aux thèmes de la télédétection, de l'agronomie, de l'agroéconomie et de l'hydrologie.

#### **2.1.1. Volet télédétection**

L'approche retenue au volet télédétection du projet ReZoTaGe met à contribution des relevés du relief et des images satellitaires multispectrales dans la reconnaissance des propriétés des sols. L'approche consiste à identifier, au moyen de modèles statistiques multivariés, les meilleures combinaisons d'indices spectraux et topographiques (variables explicatives) permettant d'expliquer la distribution des propriétés morphologiques des sols (variables expliquées).

La classification du paysage en zones homogènes (pédo-paysages) à partir d'indices topographiques issus de modèles numériques de terrain (MNT) est une approche qui a fait ses preuves dans le support à la cartographie pédologique (MacMillan, 2009). Plus récemment, des études pilotes réalisées en Montérégie, au Québec, ont démontré l'intérêt de cette approche à l'échelle intra-parcellaire en ayant recours à des relevés LiDAR (Michaud et al. 2009a). Dans le cadre du présent projet, l'approche de segmentation des MNT a été combinée à la reconnaissance indirecte des propriétés physico-chimiques des sols au moyen de valeurs de réflectance, captée par télédétection. Une validation expérimentale de cette approche a été réalisée sur un bassin versant expérimental (30 km<sup>2</sup>) en Montérégie (Sylvain et al., 2011). Suivant un développement et un calage de la méthode en situation contrôlée (laboratoire), le recours aux images satellitaires avait alors permis de discriminer avec succès les propriétés du sol relatives à l'humidité et à la texture.

Le projet REZOTAGE a permis d'appliquer l'approche proposée par Sylvain et al.(2011) à trois autres zones en Montérégie, couvrant des territoires beaucoup plus grand, localisés dans les bassins versants de la baie Lavallière (326 km<sup>2</sup>), de la rivière Esturgeon (473 km<sup>2</sup>) et de la Baie Missisquoi (514 km<sup>2</sup>). L'application de la méthode s'est également enrichie du recours à un plus grand nombre d'images satellitaires couvrant une vaste gamme d'humidité des sols. La mise en relation spatiale et statistique des grands ensembles de données pertinentes au relief, aux images satellitaires et aux observations morphologiques sur les sols a ainsi permis une validation opérationnelle de la méthode de détection des propriétés des sols.

Suivant une classification des images et des entités topographiques, l'attribution des propriétés des sols du parcellaire s'est appuyée sur une procédure de calage mettant à profit les banques de données pédologiques géoréférencées disponibles pour les comtés de Richelieu, Napierville, Laprairie, Rouville et Iberville. Pour chacune de ces trois régions ciblées par l'étude différentes cartes de variabilité des propriétés du sol ont été réalisées à l'échelle parcellaire de même qu'à l'échelle du territoire ciblé.

La cartographie haute résolution (1:5 000) du parcellaire (formats « papier » et électronique) de chacun des champs des quinze entreprises agricoles participantes inclut les indices hydrologiques (micro-bassins, parcours de l'eau) dérivés des relevés topographiques, de même que les indices de propriétés des sols développés à partir des images multispectrales (textures de la couche arable et de l'horizon « B »; classe de drainage). Les propriétés des champs sont représentées sur trois cartes. Une première carte illustre les pédo-paysages du territoire à l'étude, localisant la position relative des champs dans le paysage du bassin versant. La seconde représente le modèle numérique de terrain (MNT) et ses dérivées hydrologiques, incluant les parcours de l'eau et les délimitations des micro-bassins à l'échelle du champ. Enfin la troisième carte illustre la distribution spatiale des propriétés des sols, soit la texture de l'horizon A, la texture de l'horizon B et la classe de drainage des sols. Les cartes sont complétées par une fiche rapportant les résultats des déterminations analytiques et des courbes de réponse à l'azote, présentées sous forme de tableaux. L'ensemble des cartes et fiche est mis à la disposition des producteurs par l'intermédiaire de leurs conseillers respectifs du club-conseil en agroenvironnement. L'ensemble des cartes réalisées à l'échelle parcellaire dans le cadre du projet sont présentées en annexe 1. Pour certains champs, les prédictions de propriétés de sol sont manquantes puisque ces champs étaient situés à l'extérieur des limites des données géospatiales disponibles. Aussi, certains champs d'un même producteur ont été cartographiés ensemble compte tenu de leur proximité.

Une cartographie à moyenne résolution (1:20 000) sur support électronique (SIG et atlas électronique convivial) de l'ensemble des indicateurs hydrologiques et des propriétés des sols a également été générée pour les trois secteurs d'étude ciblés. Les données géospatiales générées ont été formatées de manière être aisément mises à la disposition des utilisateurs. Produites en format *shapefile* ou *grid*, elles peuvent être utilisées dans le Système d'Information Géographique (SIG) ArcGIS de la compagnie ESRI et dans d'autres SIG, dont la plupart des logiciels libres qui permettent l'importation dans ces formats de données. Les couches d'information produites sont transmises avec une légende facilitant la familiarisation avec les données. L'atlas électronique rassemble l'ensemble des cartes produites en format PDF, permettant d'avoir une vue complète des résultats de chacune des trois régions à l'étude. Des cartes situant la position des trois régions à l'étude et des 14 sites expérimentaux sont également incluses dans l'atlas. La représentation des cours d'eau, du réseau routier ainsi que des orthophotos y facilitent la localisation des champs. Les textures provenant des cartes pédologiques sont également représentées, permettant la comparaison avec la distribution spatiale des propriétés des sols prédites dans le cadre du projet. L'Atlas en format PDF réalisé dans le cadre du projet est joint en annexe 2.

Un utilitaire informatique rassemblant l'ensemble des procédures de traitements statistiques développées et mises à profit dans le cadre du projet a également été développé. Sa programmation en langage « R », largement utilisé dans la communauté des développeurs de logiciels libres, en assure le caractère transférable auprès des utilisateurs potentiels. Afin de faciliter les nombreuses requêtes de gestion de données géospatiales, le code développé dans le cadre du projet établit les liens entre les différentes couches d'information au moyen d'un autre Système d'information géographique (SIG) libre, soit *SAGA G/S*. L'association des deux outils permet ainsi d'intégrer un grand nombre d'indices et d'évaluer la performance de différentes combinaisons de ceux-ci à prédire les propriétés des sols. Lorsque cette évaluation est réalisée manuellement, le processus s'avère laborieux et extrêmement long. Le code développé permet de réduire de façon très importante le temps de travail, facilitant l'application

de l'approche développée à d'autres régions agricoles disposant des mêmes données géospatiales.

La méthode de prédiction des propriétés de sol développée est itérative. Plusieurs modèles combinant divers indices (images) sont réalisés et mis en commun pour créer la prédiction finale. Les indices spectraux sont calculés uniquement sur les sols nus (cultures annuelles sur des images de printemps). Chaque modèle s'applique ainsi qu'aux seuls secteurs où toutes les images sont en sols nus. Les applications itératives des modèles, combinant différents indices, permettent ainsi une couverture croissante du territoire à l'étude, suivant des succès de classification variables. Contrairement à une approche de sélection manuelle des indices, le nouveau code développé choisit aléatoirement des combinaisons d'indices et multiplie le nombre d'itérations pouvant être réalisées.

En complément de la prédiction de la propriété de sol, le code développé permet de cartographier le taux de succès de la prédiction. Ainsi, pour chaque pixel auquel est attribué une valeur prédite de texture ou de drainage, il est possible de connaître la fiabilité de cette prédiction. Le code tient par ailleurs compte du nombre de sites d'entraînement et de la distribution des données, permettant de gérer la colinéarité entre les variables et de vérifier que le nombre de données d'entraînement est supérieur au nombre de variables explicatives. Il permet également de scinder le territoire en différentes zones pour les cas où le territoire à l'étude présenterait une trop grande variabilité, et de réunir par la suite les différentes zones pour réaliser la classification finale. Enfin, la dernière version du code intègre une validation indépendante réalisée à partir de 30 % des données morphologiques des profils de sol. Compte tenu de sa facture libre, le code est aisément transférable. Il est également annoté de manière à ce que les utilisateurs éventuels s'approprient son fonctionnement.

Les sections subséquentes du rapport décrivent plus en détails les méthodes et les résultats obtenus, suivant les principales étapes de réalisation du projet, depuis l'acquisition des données géospatiales jusqu'à l'édition finale des cartes thématiques.

#### 2.1.1.1. Acquisition des images

La première étape du volet télédétection a consisté à identifier les images satellitaires utilisables dans le cadre du projet. Les images devaient avoir été prises au printemps après la fonte des neiges. Elles devaient être dépourvues le plus possible d'une couverture nuageuse et avoir été prises en conditions d'humidité des sols variables. Pour ce faire, les précipitations antécédentes à la prise des images ont été vérifiées. À l'origine, 12 dates d'acquisition différentes avaient été sélectionnées. Toutefois, à l'automne 2013 un travail supplémentaire au niveau du volet télédétection a été réalisé. Trois images supplémentaires ont été acquises afin de couvrir davantage de territoire. En effet, les propriétés des sols de certains champs ne pouvaient être cartographiées compte tenu du faible nombre d'images représentatives de sols nus. Les trois images supplémentaires acquises proviennent du capteur Landsat 5. Ces 15 dates d'acquisition représentent donc au total 30 images satellitaires Landsat compte tenu que les trois zones d'étude sont réparties sur le territoire de 2 images. La figure 1 présente les trois zones à l'étude tandis que la figure 2 illustre les superficies couvertes par les images satellitaires Landsat.

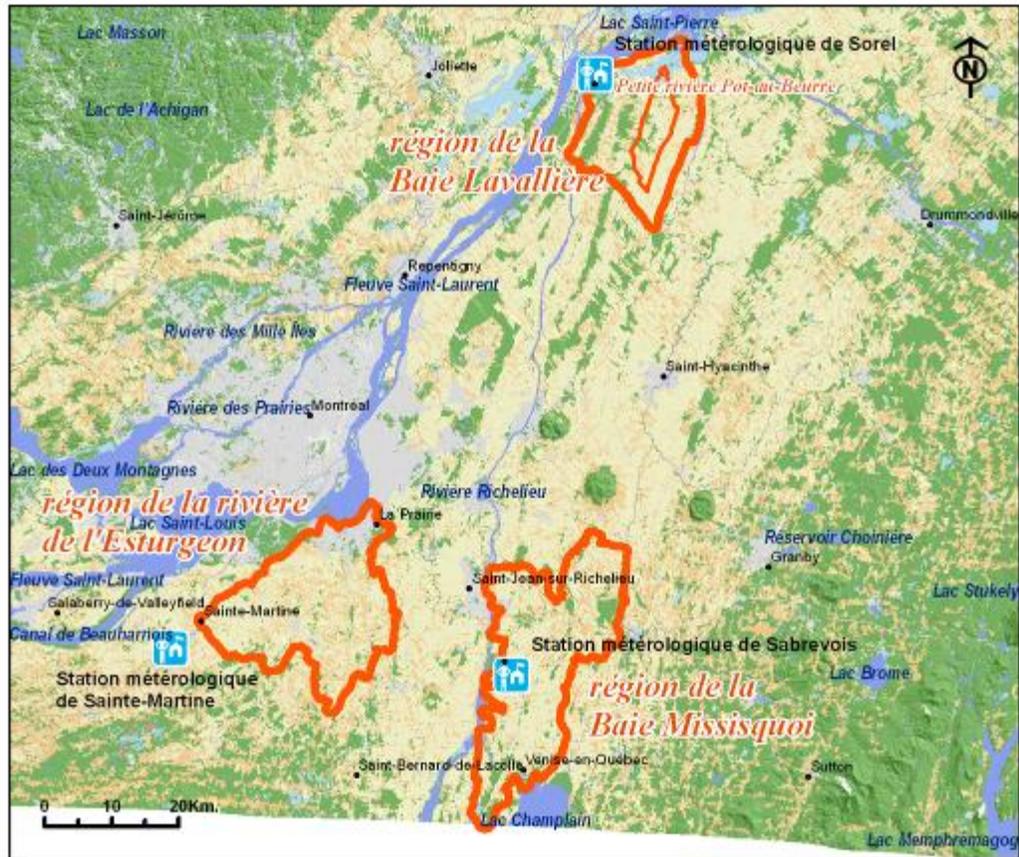
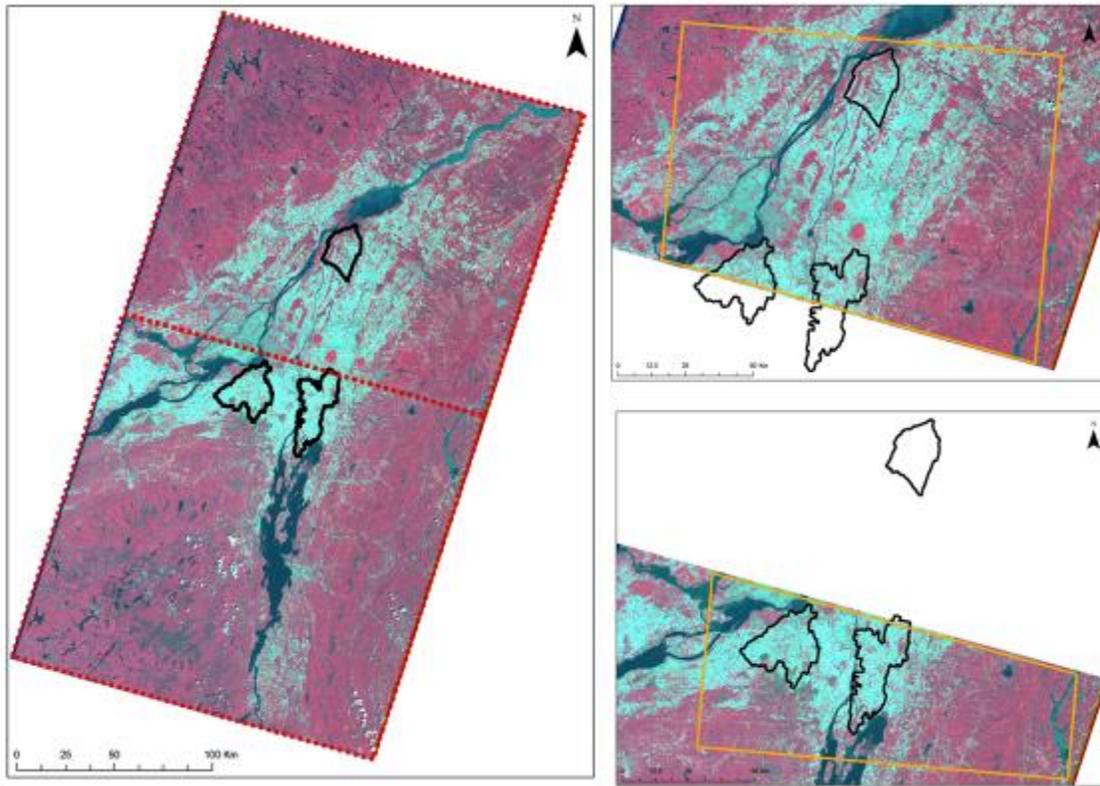


Figure 1. Localisation des trois zones d'étude du projet ReZoTaGe.



**Figure 2. Superficies couvertes par les images satellitaires Landsat.**

Le tableau 1 présente les précipitations les journées précédentes à la prise des images retenues pour le projet. Notons la grande variabilité des conditions antécédentes de précipitations. Cette variabilité est souhaitable, puisque des conditions d'humidité du sol variables permettent de mieux discriminer les propriétés des sols. La méthode de reconnaissance des propriétés des sols mise en effet sur le contraste entre les réflectances d'un même site à des périodes différentes. Pour une présentation détaillée des principes et méthodes de cette approche de traitement d'images multi-temporelles, le lecteur est invité à se référer au mémoire de Sylvain (2011).

Le traitement initial des images a retenu l'image du 7 mai 2001 comme image de référence en condition de sol sec. L'image «sèche» est largement utilisée en support à la normalisation des indices spectraux calculés ultérieurement. Le choix de l'image de référence en conditions sèches a un grand impact sur la couverture de la cartographie. Puisqu'elle sert à normaliser plusieurs indices, la production des indices normalisés se limite dès lors qu'aux seuls secteurs en sol nu couvert par l'image de référence en conditions sèches. En cours de projet, compte tenu de la couverture limitée en sols nus de l'image de référence de 2001, le calcul des indices spectraux a été repris suivant l'acquisition d'images plus récentes. Les images du 19 avril 2009 ont finalement été utilisées pour la normalisation des indices calculés sur l'ensemble des autres images acquises dans le cadre du projet. L'image du 29 juin 1994 est pour sa part représentative des précipitations antécédentes les plus élevées de la série des 15 images retenues, tel que rapporté au tableau 1.

**Tableau 1. Précipitations moyennes (en mm) aux stations météorologiques d'Environnement Canada de Sainte-Martine (région Esturgeon), Sabrevois (région Missisquoi) et Sorel (région Lavallière).**

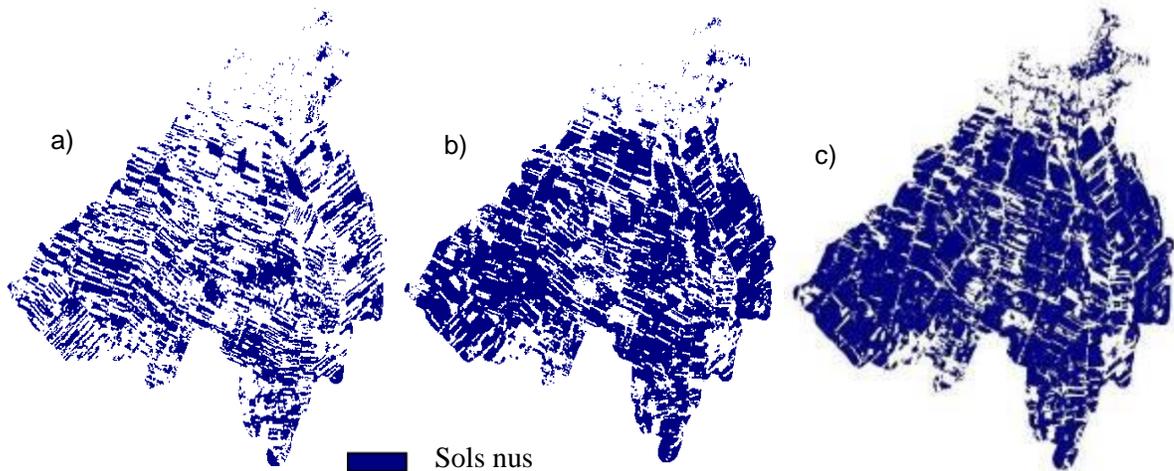
Image	Capteur	Date d'acquisition		Station STE MARTINE			Station SABREVOIS			Station SOREL		
		Année	Jour et mois	7 jours	14 jours	21 jours	7 jours	14 jours	21 jours	7 jours	14 jours	21 jours
1-2	Landsat	2009	19-avr	0.2	1.2	3.2	0.3	1.3	2.8	0	1.6	2.9
3-4	Landsat	2009	21-mai	2.3	3.8	3.4	4.1	4.4	4.2	4.3	3.5	3.3
5-6	Landsat	2005	10-mai	0	3.6	4.5	0.2	2.8	4.1	0	3.6	4.6
7-8	Landsat	2001	07-mai	0.6	0.3	0.3	0.6	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4
9-10	Landsat	2001	08-juin	3.3	4.5	5.4	2.6	2.6	3.3	3.4	5.0	3.6
11-12	Landsat	1999	24-avr	0.0	0.4	0.9	0.5	1.1	1.6	0.1	0.1	1.0
13-14	Landsat	1999	11-juin	0.2	1.4	1.6	1.7	1.7	2.2	3.9	4.6	4.6
15-16	Landsat	1998	21-avr	0.0	0.0	0.8	3.3	1.6	1.9	2.6	1.3	1.8
17-18	Landsat	1995	16-juin	0.6	3.2	2.9	1.1	4.7	4.1	2.8	2.4	2.9
19-20	Landsat	1994	13-juin	3.7	2.4	3.4	5.7	3.2	3.9	5.2	3.6	4.4
21-22	Landsat	1994	29-juin	7.3	3.6	3.2	9.2	5.1	5.0	15.1	10.0	8.8
23-24	Landsat	1993	09-mai	3.6	2.3	5.4	3.4	2.1	5.5	1.8	1.6	4.1
25-26	Landsat	1991	20-mai	2.6	2.8	2.9	2.9	2.5	2.6	1.6	1.8	2.1
27-28	Landsat	1987	10-juin	7.1	5.7	4.6	4.6	4.2	4.0	7.6	10.6	9.0
29-30	Landsat	1984	17-juin	0.2	2.0	2.8	0.2	2.8	3.3	1.2	1.4	1.9

Suivant leur acquisition, les images ont été traitées afin de les rendre utilisables. La géoréférence des images a d'abord été vérifiée et lorsqu'elle n'était pas satisfaisante, les images concernées étaient géoréférencées de nouveau. Ces images, qui couvrent de grandes superficies, ont également été coupées pour les restreindre à nos secteurs d'étude. Les corrections atmosphériques et radiométriques ont ensuite été complétées pour l'ensemble des images Landsat. Ces corrections permettent d'éliminer l'effet de brume ainsi que de convertir les comptes numériques des images en réflectance. Le logiciel Atcor 3 a été utilisé pour effectuer ces corrections. De plus, la réalisation des corrections atmosphériques nécessite l'utilisation de modèles numériques d'élévation (MNE). Ainsi un modèle numérique d'élévation au 1 : 20 000 couvrant l'ensemble des secteurs ciblés a été corrigé et traité pour assurer sa compatibilité avec les images satellitaires.

### 2.1.1.2. Cartographie des sols nus

La méthode de classification des propriétés des sols retenue requière la réalisation de couches d'utilisation du sol, car les indices spectraux utiles pour le présent projet sont dérivés exclusivement sur les secteurs en sols nus. Puisque les images identifiées ont été prises sur une période de plusieurs années, la répartition des cultures et des sols nus n'est pas fixe. À chaque image correspond ainsi une utilisation du territoire spécifique. Dans le cas où plus d'une image ont été sélectionnées pour la même année, l'identification de l'utilisation du territoire a tout de même dû être réalisée pour toutes les images compte tenu de la présence variable de nuages. La méthode utilisée pour identifier les différentes utilisations du territoire est basée sur la segmentation des images satellitaires en zones possédant des propriétés semblables. En résumé, la méthode utilisée consiste d'abord en la réalisation d'analyses en composantes

principales (ACP) permettant de regrouper l'information spectrale contenue dans différentes bandes de manière à exprimer différents aspects de l'image. Ensuite, dans le logiciel libre SAGA GIS, les ACP ont été introduites dans un module de segmentation, lequel regroupe les pixels «se ressemblant» de manière à former des zones ayant une utilisation du territoire semblable. Une fois ces zones créées, il reste à interpréter les pixels agglomérés à l'aide du composé couleur des images multispectrales afin d'associer la bonne utilisation du territoire au bon groupe de pixel. La figure 3 représente les sols nus pour trois années distinctes dans le secteur d'étude de l'Esturgeon. Ces trois images ont été prises à 14 années d'intervalle pour les deux premières et 8 ans d'intervalle pour les deux dernières. La progression dans le temps des cultures annuelles explique la plus grande superficie de sols nus sur les images b) et c).



**Figure 3. Sols nus (en bleu) de la région de l'Esturgeon : a) image du 10 juin 1987, b) image du 8 juin 2001, et c) image du 10 mai 2009.**

### 2.1.1.3. Calcul et cartographie des indices spectraux

Une série d'indices spectraux ont été calculés sur les secteurs en sols nus de l'ensemble des 30 images retenues pour l'étude. Les indices spectraux ont été développés suivant le principe que la brillance des sols est influencée par la matière organique, la texture, la couleur et l'humidité des sols (Sylvain, 2011). Des indices de brillance (IB) «humide» et «sec» ont ainsi été dérivés pour chaque image à partir des bandes de réflectance TM2 et TM4. (tableau 2). L'image utilisée pour dériver l'indice de brillance «sec» fut celle du 19 avril 2009. Celle-ci permet de minimiser l'effet de l'humidité et de mettre en relief les autres propriétés des sols, notamment le taux de matière organique du sol (MOS), la texture et la couleur. L'ensemble des IB estimés pour les autres images sont dès lors considérés « humides ».

Afin d'isoler les différentes propriétés des sols influençant leur brillance, quatre autres indices ont été dérivés à partir des IB humides et secs (tableau 2).

- L'indice de brillance normalisé (IBN) témoigne de l'égouttement des sols, en normalisant les indices de brillance observés en conditions humides par rapport à l'indice de brillance de référence en condition sèche.
- L'indice de brillance normalisé corrigé (IBNc) témoigne aussi de l'égouttement du sol, en prenant toutefois en compte l'effet de la couleur.
- L'indice de matière organique (IMO exprime le taux de matière organique du sol.
- L'indice de couleur (ICOM) est corrélé avec la couleur et la texture des sols.

**Tableau 2. Indices spectraux utilisés dans le cadre du projet ReZoTaGe.**

Type d'indice	Équation	Propriétés de l'indice
Indice de matière organique	$IMO_{ti} = \frac{1}{TM2_{ti}^2}$	Sensible au taux de matière organique présent dans le sol.
Indice de couleur	$ICOM_{ti} = \frac{TM2_{ti}^2}{IBSn_{ti}}$	Sensible à la couleur et à la texture du sol.
Indice de brillance	$IB = \sqrt{TM4^2 + TM2^2}$	Sensible à l'ensemble des propriétés du sol.
Indice de brillance normalisé	$IBNn_{ti} = \frac{\left(1 - \left(\frac{IBHn_{ti}}{IBSn_{ti}}\right)\right)}{IBHn_{ti}}$	Sensible à l'humidité présente dans le sol.
Indice de brillance normalisé corrigé	$IBNc_{ti} = \text{Log}\left(\frac{IBSn_{ti}TM2_{ti}^{-1}}{IBHn_{ti}^3}\right)$	Sensible à l'humidité, il corrige pour l'effet de la couleur, de la texture et de la matière organique

t et i : période d'acquisition et localisation du pixel.

TM2 et TM4 : réflectances respectives pour les bandes 2 et 4 des satellites LANDSAT.

IBSn et IBHn : indices de brillance sec et humide, respectivement, pour la bande spectrale « n ».

Source : Sylvain, 2011.

Cinq indices ont donc été systématiquement dérivés pour chacune des 30 images à l'étude. La mise en commun de l'ensemble de ces indices à différentes dates permet de couvrir une vaste gamme de conditions d'humidité des sols. À titre d'exemple, la figure 4 compare l'IB pour une image prise en condition de forte humidité des sols et une autre image caractérisée par de faibles précipitations antécédentes. La figure 5 présente pour sa part l'IBNc pour ces deux mêmes images. Une représentation spatiale des indices à plus haute résolution est illustrée en figure 6 pour des champs du même territoire, dans le bassin de l'Esturgeon. Les contrastes observés dans les indices spectraux calculés témoignent vraisemblablement de gradients spatiaux dans les propriétés des sols à l'intérieur des champs. Ceux-ci sont relativement mieux mis en relief par l'indice IBNc (indice de brillance normalisé corrigé).

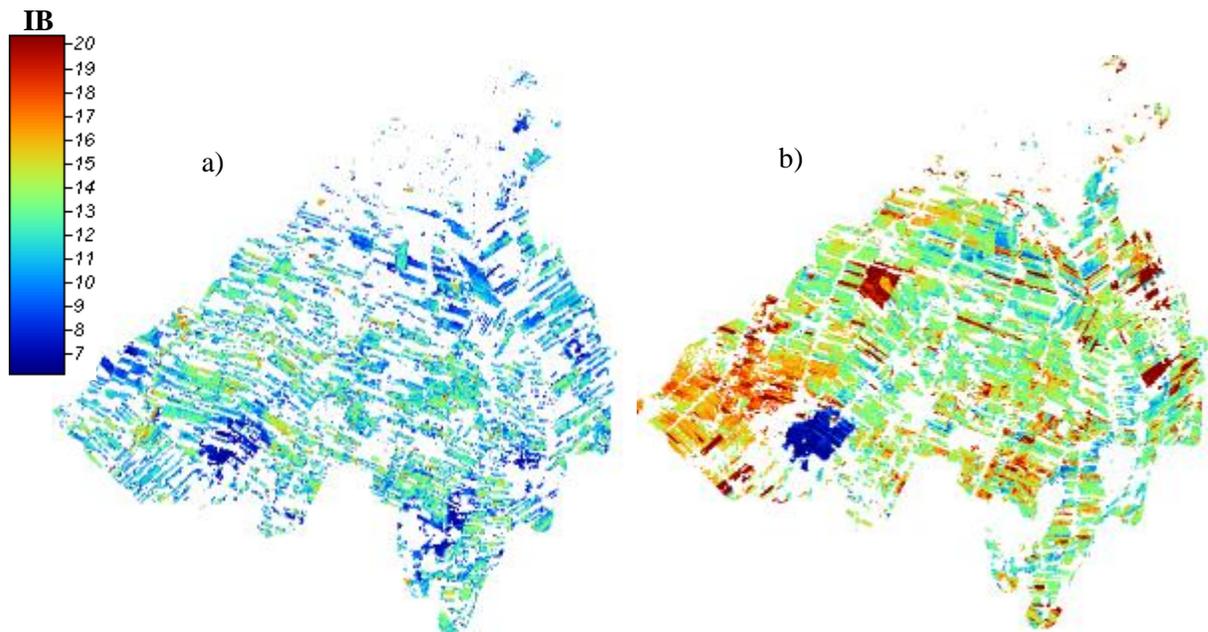


Figure 4. Indice de brillance (IB) des sols de la région de l'Esturgeon pour a) une image «humide» (10 juin 1987), et b) une image «sèche» (21 avril 1998).

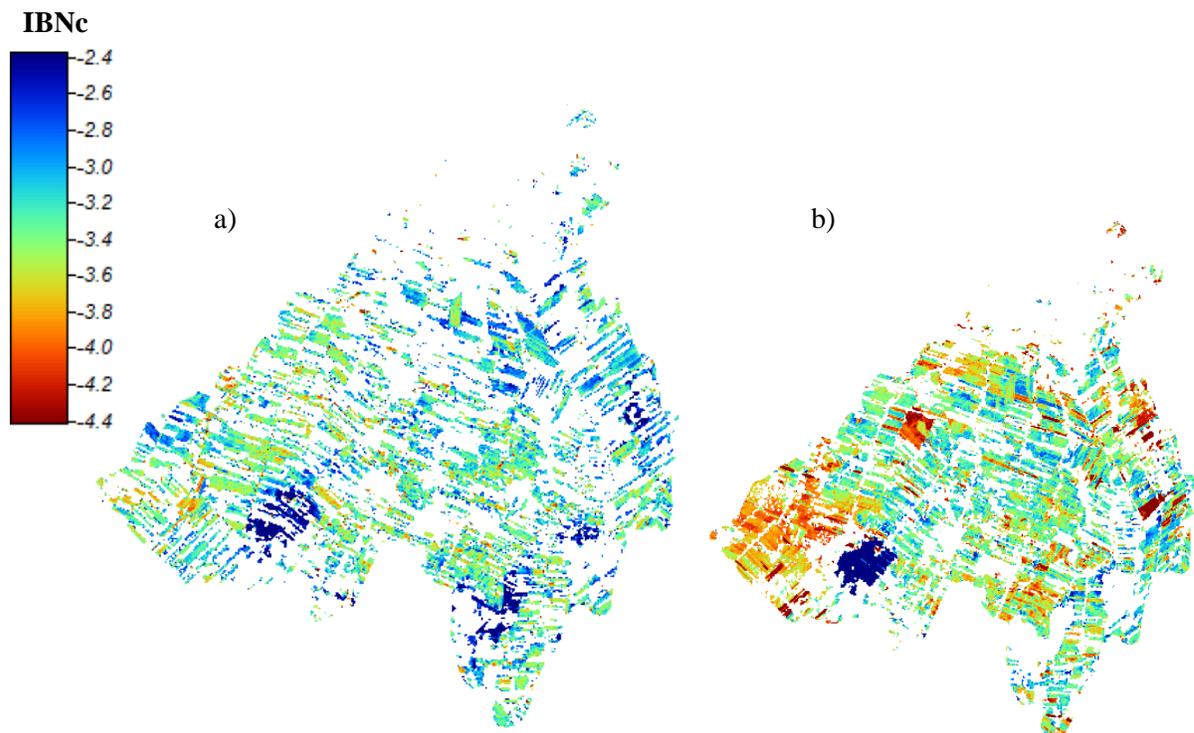


Figure 5. Indice de brillance normalisé corrigé (IBNc) des sols de la région de l'Esturgeon pour a) une image «humide» (10 juin 1987), et b) une image «sèche» (21 avril 1998).

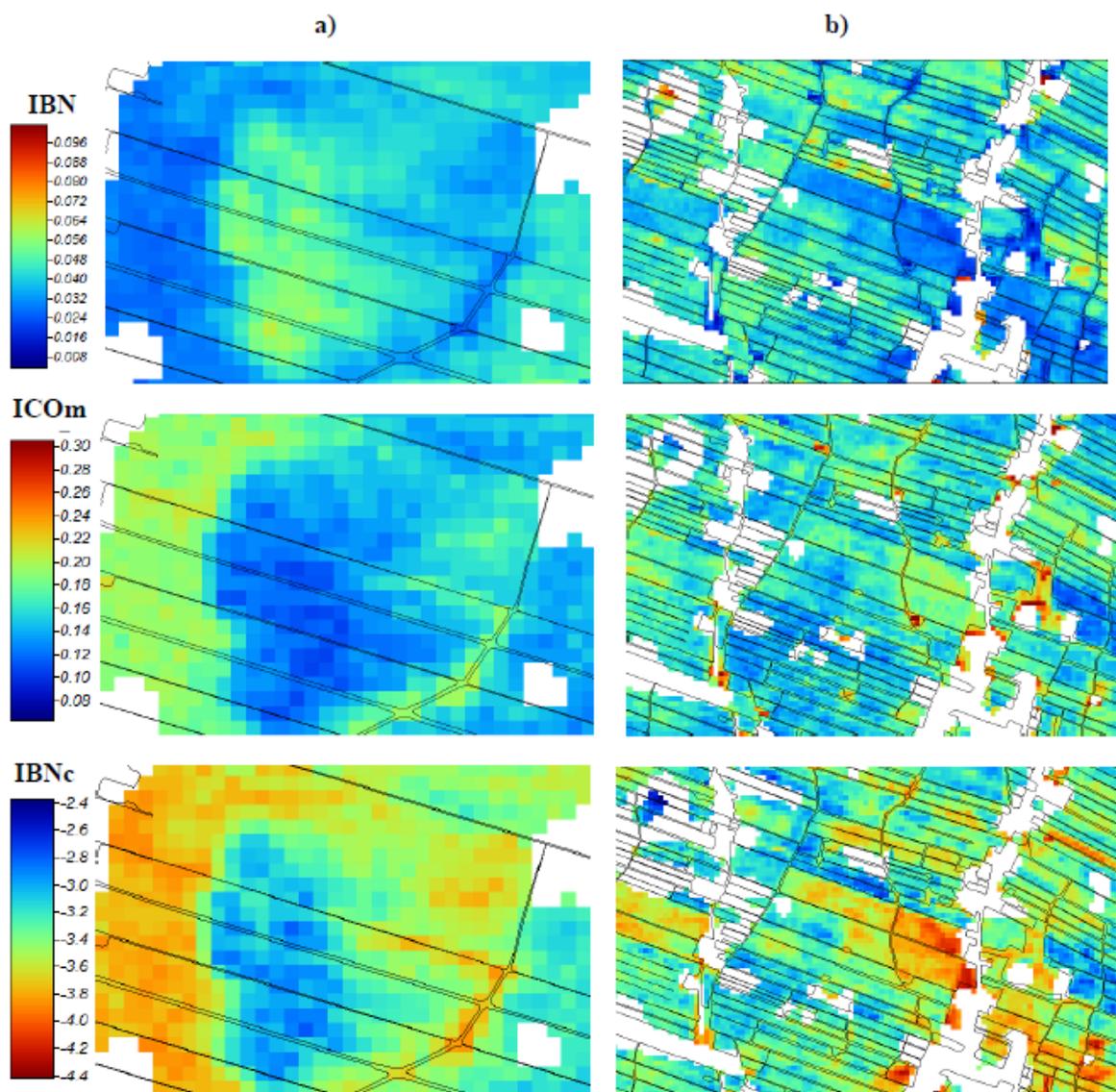


Figure 6. IBN, ICOM, IBNc dérivés de l'image Landsat du 21 avril 1998 (image en conditions sèches) pour deux zones distinctes du bassin versant de l'Esturgeon (a et b).

#### 2.1.1.4. Traitement des données d'élévation et production de dérivés

Les relevés altimétriques LiDAR ont été utilisés dans les secteurs d'étude de la Baie Lavallière et de l'Esturgeon pour dériver une classification hydro-pédologique du territoire à partir du logiciel LandMapR. Cette classification du paysage a également été réalisée pour le secteur de la Baie Missisquoi à partir d'un modèle numérique d'élévation (MNE) d'une résolution de 10 mètres. Dans tous les cas, les MNE ont d'abord été ré-échantillonnés à une résolution de 15 m. Ce lissage a pour but d'extraire l'effet de certains artefacts (fossés, ponceaux, etc.) sur le traitement du MNE, afin de bien révéler les entités propres au paysage. Les cours d'eau ont également été encavés de manière à s'assurer que les parcours de l'eau reflètent bien la réalité du terrain. Suivant le traitement des MNE, ceux-ci ont été introduits dans les différents modules de LandMapR, dont trois sont utilisés pour la classification hydro-pédologique. L'organigramme de LandMapR est présenté à la figure 7.

FlowMapR utilise d'abord le MNE pour calculer les directions d'écoulement de l'eau et l'accumulation de l'eau, permettant ainsi d'identifier le réseau hydrographique. Les sorties du module FlowMapR incluent, entre autres, les sous-bassins versants et les parcours de l'eau. Le second module, FormMapR, utilise les résultats de FlowMapR pour calculer une suite de dérivés terrain provenant du MNE. Les sorties du module sont notamment les pentes, les orientations, les courbures du terrain, l'aire en amont et diverses distances reliées au réseau hydrographique (ex : distance verticale au-dessus du cours d'eau le plus près). Enfin, le troisième module utilise les dérivés de FormMapR pour classier chaque cellule du MNE en une des 15 classes de paysages possibles. Le module FacetMapR est basé sur le concept de logique floue qui permet de déterminer l'appartenance d'objets à des classes dont les limites ne sont pas clairement définies. Ainsi, l'information fournie est un degré d'appartenance à une classe. Chaque pixel du MNE se voit ainsi attribué une des quinze classes possibles, où le degré d'appartenance est le plus élevé. Les 15 classes peuvent également être regroupées afin de simplifier la classification des unités de paysage. Dans le cadre du présent projet, le nombre de classe a été réduit à cinq, incluant la crête aplatie, le revers de pente, la terrasse, le bas de talus et le niveau le plus bas de la pente. La figure 8 illustre les résultats de la classification du paysage pour la zone d'étude de la Baie Lavallière en comparaison au modèle numérique d'élévation utilisé en donnée de base. Les données d'élévation regroupées par classes ainsi que la position dans le paysage sont tous deux des intrants au modèle de prédiction des propriétés des sols, lequel fait aussi appel aux indices spectraux décrits précédemment.

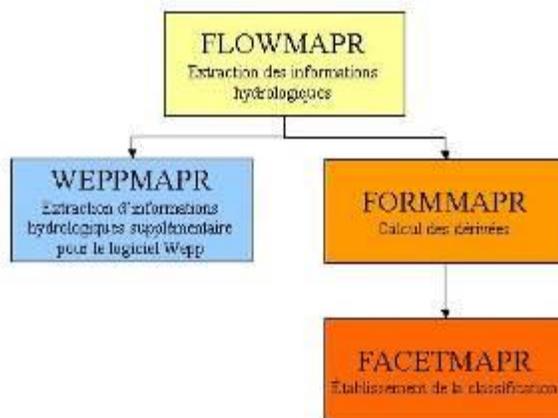
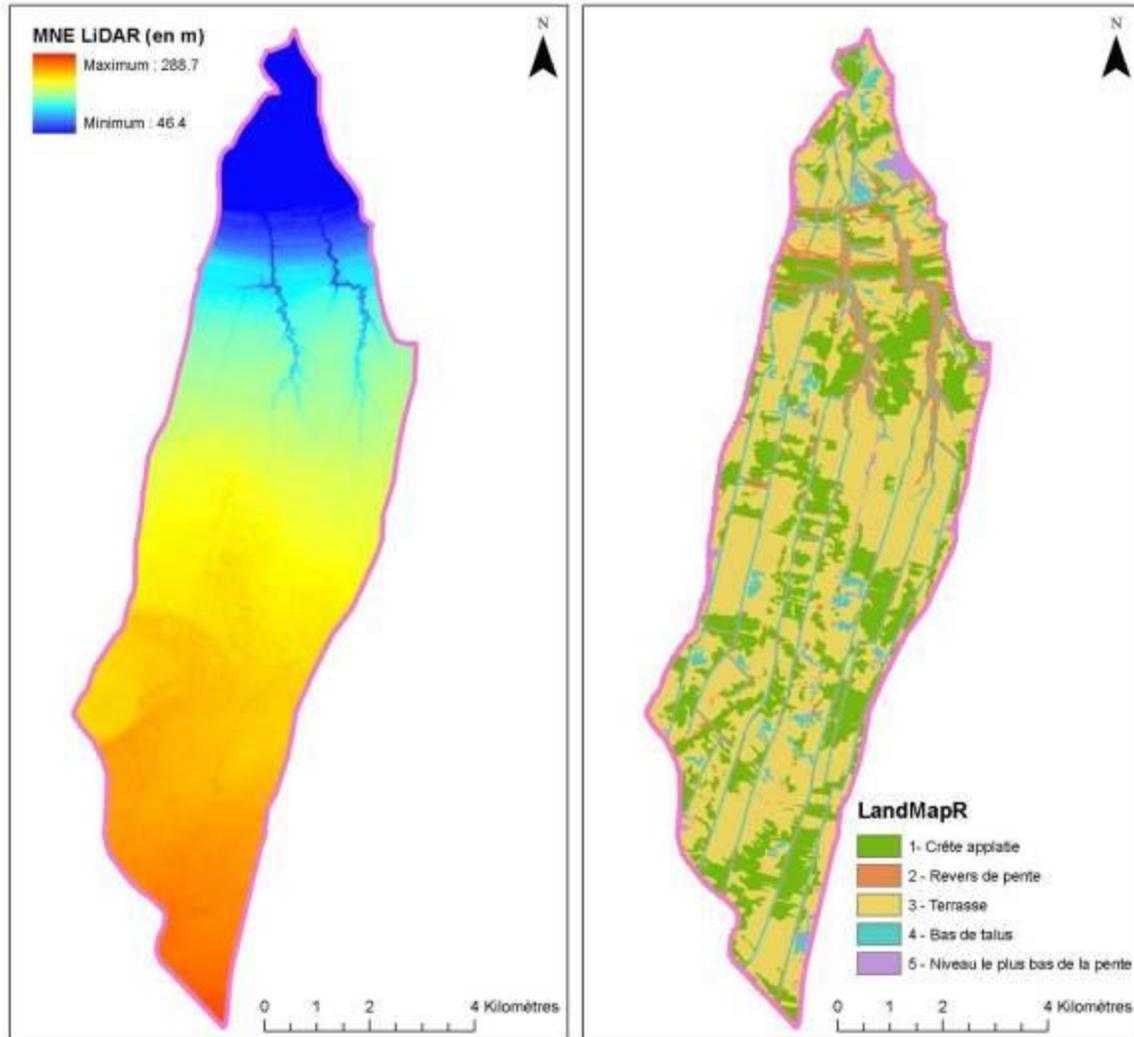


Figure 7. Organigramme de LandMapR (source : I. Beaudin et G. Laflamme, 2005<sup>1</sup>)

<sup>1</sup> Beaudin, I. et G. Laflamme. 2005. Utilisation du logiciel LandMapR pour la segmentation du territoire en pédo-paysages – Bassin versant du Bras d'Henri et sous-bassin d'intervention. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc., Québec, Canada, 55 p.



**Figure 8. Modèle numérique d'élévation (MNE) LiDAR et position dans le paysage de la zone d'étude de la Baie Lavallière.**

### 2.1.1.5. Mise en forme des données pédologiques

Les observations pédologiques géoréférencées sont au cœur de la démarche de développement des modèles de prédiction des propriétés des sols. Elles servent d'une part à établir les combinaisons des différents indices spectraux et topographiques les plus aptes à décrire les propriétés du sol, puis à valider les modèles développés. Les données pédologiques utilisées dans le cadre du projet ont été fournies par l'équipe de Michel Nolin du Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les données mises à profit dans le projet incluent les descriptions morphologiques des profils de sols, de même que leurs banques de données analytiques (dosages en laboratoire des propriétés des sols) lorsque disponibles. Les figures 9 à 11 illustrent les données ponctuelles disponibles pour les trois zones d'étude colligées par l'équipe pédologique d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) dans le cadre des cartographies pédologiques des comtés de Richelieu, Napierville, Laprairie et Iberville. Les données de ces trois derniers comtés étaient déjà

géoréférencées et prêtes à alimenter les protocoles d'analyse statistique. Les données du comté de Richelieu ont cependant été acquises antérieurement à celles des trois autres régions, et n'ont pas profité de la même procédure de saisie et de géolocalisation. Aussi, un chantier de saisie de ces données morphologiques originales en « format papier » datant du début des années 1980 a été entrepris au moyen d'une étroite collaboration entre les équipes d'AAC, de l'IRDA et de l'Université de Sherbrooke. Claudia Barboni, étudiante au département de géomatique appliqué de l'Université de Sherbrooke, a réalisé la saisie informatisée des données manuscrites. Elle a d'abord pu profiter d'une initiation terrain de la part de Lucie Grenon (AAC, Saint-Jean) quant aux techniques de description des profils de sol et de l'indexation informatisée des différentes données morphologiques. André Martin, de l'équipe pédologique d'AAC à Québec a pris le relais dans la formation aux techniques d'archivage et de traitement des données. Compte tenu de l'ampleur que représente ce travail, l'exercice a été centré sur le bassin de la Petite rivière Pot-au-Beurre, retenu pour les fins de l'étude.

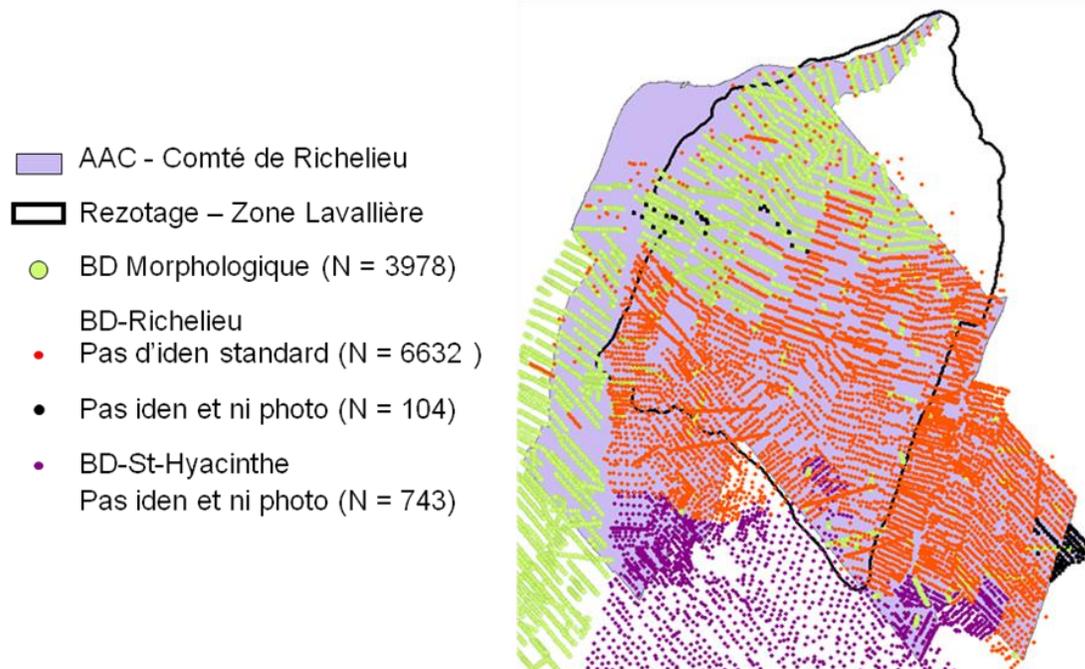


Figure 9. Profils de sols d'AAC de la zone de la Baie Lavallière (Source : Isabelle Perron, AAC, 2012).

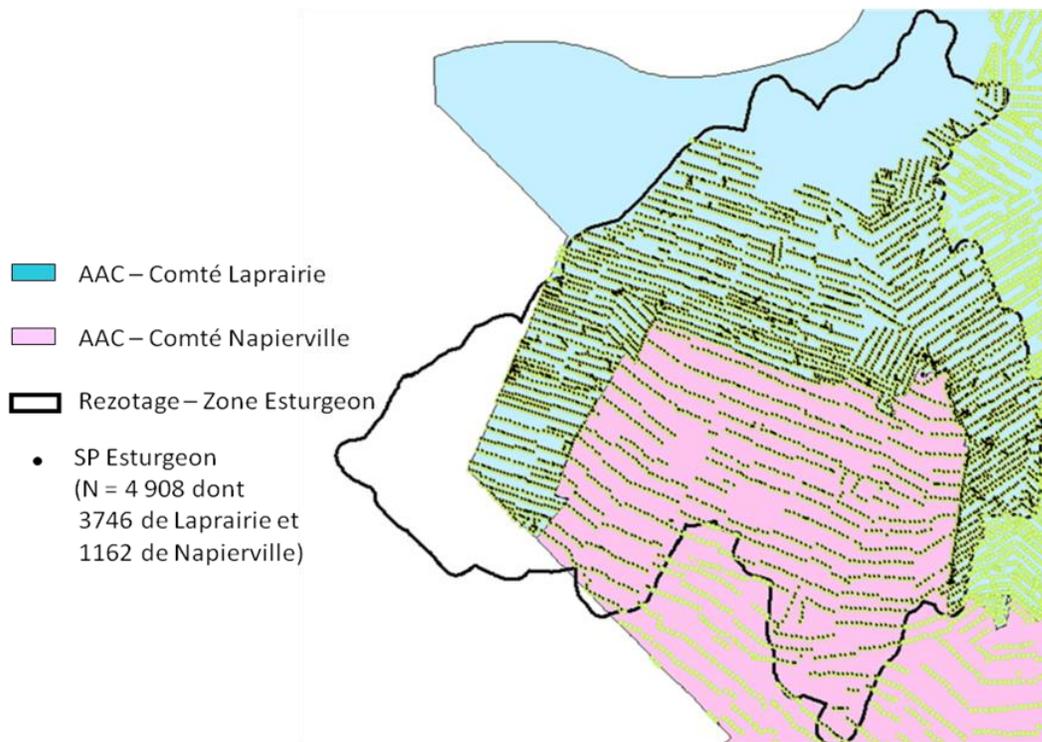


Figure 10. Profils de sols d’AAC de la zone de l’Esturgeon (Source : Isabelle Perron, AAC, 2012).

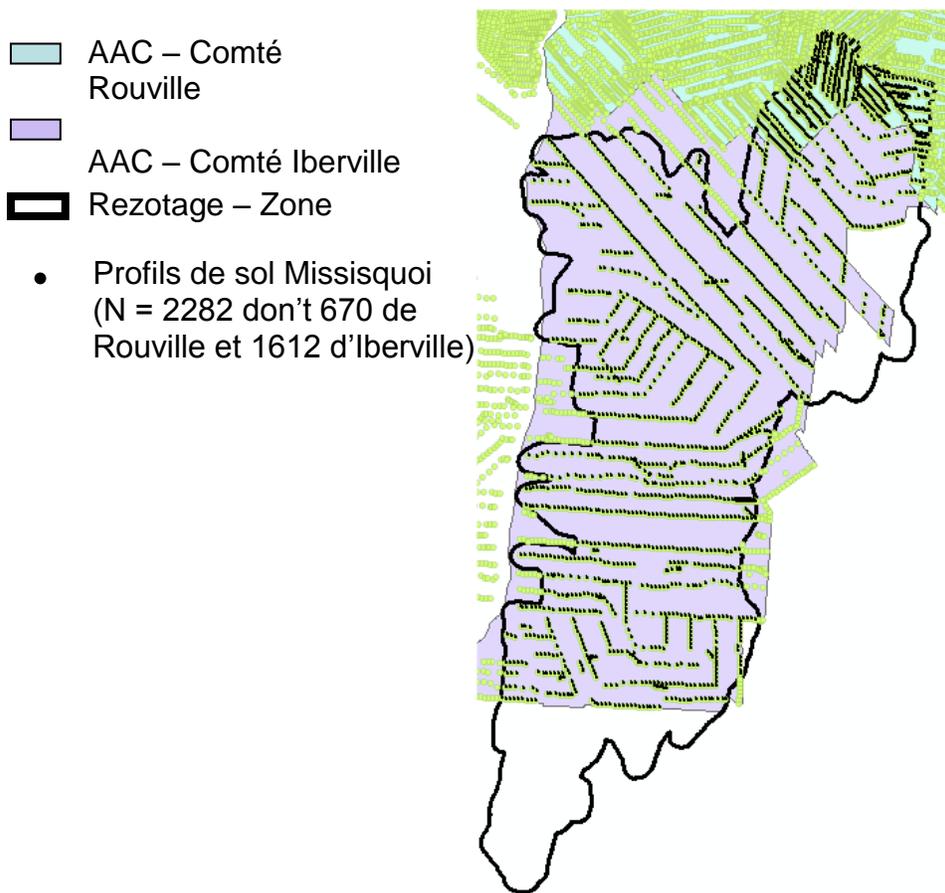


Figure 11. Profils de sols d'AAC de la zone de Missisquoi (Source : Isabelle Perron, AAC, 2012).

#### 2.1.1.6. Prédiction et cartographie des propriétés des sols

Suivant la réalisation des bases de données pour l'ensemble des régions à l'étude, l'étape suivante du volet télédétection du projet consiste à combiner dans une analyse discriminante<sup>2</sup> l'ensemble des indices spectraux calculés avec les relevés altimétriques, la classification hydro-pédologique du territoire et les données pédologiques. Les fonctions discriminantes issues de l'analyse sont utilisées pour produire des cartes de propriétés des sols, incluant le groupe de texture de l'horizon A, le groupe de texture de l'horizon B, et la classe de drainage. Les groupes de texture de l'horizon A et de l'horizon B sont subdivisés en sept classes couramment utilisés en pédologie au Québec et au Canada, soit : 0- Organique, 1- très grossière, 2- Grossière, 3- Moyenne, 4- Modéré fine, 5- Fine, 6- Très fine. Le tableau 3 illustre la composition de ces différents groupes de texture. Les classes de drainage du système de classification canadien CANSIS ont également été retenues, soit : 1- Très rapidement drainé, 2- Rapidement drainé, 3-

<sup>2</sup>L'analyse discriminante (AD) est une méthode d'analyse multivariée utilisant l'information contenue dans plusieurs variables (dans ce cas-ci les indices spectraux) pour produire des fonctions discriminantes (FD). Les fonctions discriminantes caractérisent les éléments d'une population en fonction de leurs groupes d'appartenance (Sylvain, 2011)

Bien drainé, 4- Modérément bien drainé, 5- Imparfaitement drainé, 6- Mal drainé, et 7- Très mal drainé.

**Tableau 3. Description des groupes de texture des horizons A et B.**

Groupe de texture	Couleur pour la cartographie	Texture
0- Organique	Brun	Sols organiques
1- Très grossière	Rouge	Sable grossier, Sable fin, sable très fin, sable grossier loameux, sable loameux, sable fin loameux
2- Grossière	Orange	Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin
3- Moyenne	Jaune	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon
4- Modérément fine	Bleu pâle	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux
5- Fine	Bleu foncé	Argile sableuse, Argile limoneuse, Argile
6- Très fine	Mauve	Argile lourde

La méthode de prédiction des propriétés de sol ici utilisée est itérative. Les prédictions des propriétés des sols ont d'abord été supportées au moyen d'une procédure manuelle de sélection de la combinaison optimale d'indices. Le premier modèle ainsi développé comprenait le plus grand nombre d'indices et possédait conséquemment le plus grand succès de classification ou de prédiction. En contrepartie, ce modèle couvrait une petite superficie de la zone d'étude. Rappelons que les indices spectraux sont calculés uniquement sur les sols nus et que chaque image satellitaire couvre un territoire spécifique de sols nus. Le modèle appliqué ne prédit donc que sur les secteurs où toutes les images/indices entrés dans le code sont en sols nus. Ainsi, plus il y a d'images, moins il y a de chance que ces territoires de sols nus se recoupent. En cumulant les applications successives des modèles, recourant à des images et des indices différents, la couverture du territoire couvert par la cartographie s'accroît, mais le succès de classification diminue.

La seconde version du code finalisée dans la deuxième année du projet a permis d'automatiser ces itérations. Le choix des indices est réalisé aléatoirement par le modèle et le succès de classification est évalué pour chaque modèle. Le nombre d'itérations utilisé est maintenant de 100, et la cartographie est réalisée pixel par pixel, retenant la prédiction la plus fréquemment proposée par les différents modèles. Ce plus grand nombre d'itérations fait en sorte d'optimiser les succès de cartographie. Aussi, 30 % des données morphologiques des profils de sol ont été retirées du modèle pour être utilisées dans la validation de la classification. Voici quelques détails sur le fonctionnement du second code développé (dit automatisé) :

- D'abord, en ce qui a trait aux données pédologiques, tous les profils de sols situés à moins de 60 mètres d'une route ont été retirés de la base de données ainsi que ceux n'étant pas séparés d'au moins 45 mètres (région de la Baie Lavallière) ou 90 mètres (régions de Missisquoi et de l'Esturgeon).
- En ce qui a trait aux données satellitaires, afin d'optimiser le code de programmation et limiter le temps de traitement pour de grands territoire, les pixels ayant moins de cinq observations (sols nus sur moins de cinq images) n'ont pas été traités. Par ailleurs, compte tenu de la taille des régions à l'étude (plusieurs centaines de kilomètres), les territoires ont été divisés en zones tenant compte de l'hétérogénéité du territoire (ex. : géologie, météorologie). Les zones ont été traitées individuellement puis réunies pour produire une classification pour l'ensemble de la région.

- Les modèles (itérations) produits sont évalués en fonction de critères statistiques, témoignant de l'ajustement des valeurs de propriétés prédites aux données observées. La procédure de sélection des modèles tient par ailleurs compte de la colinéarité entre les variables. De facto, les indices tendent à être effectivement corrélés car ils ont été développés à partir des mêmes bandes spectrales des images satellitaires. Aussi, les modèles présentant un degré de colinéarité entre les variables explicatives au-dessus de 50 % ont systématiquement été exclus.
- Afin d'assurer la qualité des prédictions, un seuil a été déterminé afin d'éliminer les modèles ne respectant pas un certain niveau de qualité. Ce seuil est modifiable au choix de l'utilisateur du code. Plus ce seuil est haut, plus la qualité de la prédiction sera élevée, toutefois, il sera plus difficile de caractériser une grande superficie du territoire. Il est également possible dans le code d'indiquer le nombre de variables (indices) minimal et maximal à utiliser dans les modèles. Ces variables sont alors choisies aléatoirement.
- Enfin, le nombre d'itérations (modèles utilisés pour produire la classification finale) peut être défini par l'utilisateur du code. Dans le cadre de ce projet le nombre d'itérations a été limité à 100. L'avantage d'inclure plusieurs itérations dans la prédiction est qu'il est ensuite possible de produire une carte de concordance des modèles et ainsi identifier les endroits où la prédiction est plus sûre, c'est-à-dire où les modèles sont plus cohérents entre eux.

#### 2.1.1.6.1. Résultats de prédiction dans la région de Missisquoi

La validation des modèles de prédiction implique la mise en relation des valeurs prédites par le modèle avec les valeurs observées. Les valeurs observées sont ici les données descriptives des profils de sol relevés sur le terrain. La matrice de confusion permet visuellement de faire cette comparaison et d'évaluer le degré d'accord entre les prédictions et les observations. Les pourcentages de succès sont exprimés dans les matrices de confusion selon deux perspectives, soit celle du producteur de la carte, qui souhaite connaître la probabilité qu'un pixel de référence soit bien classifié, et celle de l'utilisateur de la carte, qui se questionne sur la probabilité qu'un pixel prédit appartienne à la dite classe. Ainsi, en complément de l'évaluation du succès global du modèle, les prédictions pour chaque classe sont évaluées selon ces deux perspectives. Les tableaux 4 à 6 présentent, pour l'horizon A, la matrice de confusion, les succès de classification du producteur (producer's accuracy) par groupe de texture, et les succès de classification de l'utilisateur (user's accuracy) par groupe de texture dans la région de Missisquoi. Notons, qu'il est de pratique courante d'évaluer l'accord entre les données prédites et observées avec plus ou moins une classe de différence. Ainsi pour l'horizon A de la région de Missisquoi, les succès par classe du producteur (plus ou moins une classe) sont respectivement de l'ordre de 80 % pour la classe 2, 96,3 % pour les classes 3 et 4, et 100 % pour la classe 5. Le succès global est par ailleurs plus élevé et se chiffre à 90,2 %. Il est rassurant d'obtenir des pourcentages de succès élevés, qui témoigne d'un ajustement satisfaisant du modèle, Un grand nombre de classes d'écart témoigneraient d'un modèle peu utilisable.

**Tableau 4. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

Groupe de texture de l'horizon A - OBSERVATIONS	Groupe de texture de l'horizon A - PRÉDICTIONS						
	0	1	2	3	4	5	
0	0	0	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	0	0	
2	0	2	3	3	2	0	
3	0	0	4	18	4	1	
4	0	0	1	6	17	3	
5	0	0	0	0	0	7	

N = 71 / Succès global : 63,4 %

**Tableau 5. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

	Groupe de texture de l'horizon A					
	0	1	2	3	4	5
Succès en pourcentage	-	-	30	66,7	63	100

**Tableau 6. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

	Groupe de texture de l'horizon A					
	0	1	2	3	4	5
Succès en pourcentage	-	0	37,5	66,7	73,9	63,6

La figure 12 illustre les résultats de la cartographie finale de la texture de la couche arable (horizon A). Pour cette carte les deux classifications (manuelle et automatisée) ont été combinées afin de couvrir le plus de territoire possible. La seconde classification réalisée à partir des 100 itérations est superposée à la classification manuelle, elle a donc prépondérance. Enfin, la figure 13 présente pour l'ensemble des 100 modèles (itérations) de la seconde classification, le pourcentage de modèles qui ont prédit la même valeur que le modèle final. Cette carte exprime ainsi la fiabilité de la prédiction et permet de localiser les secteurs où la classification est plus certaine (nombre de modèles congruents plus élevés) en comparaison aux secteurs où les modèles sont moins constants dans les valeurs prédites. Globalement, les modèles semblent constants dans la prédiction de la texture de l'horizon A, le pourcentage d'accord se rapprochant de 99 sur de grandes superficies. Seuls de petits secteurs ont des pourcentages d'accord entre de l'ordre de 50 à 75%.

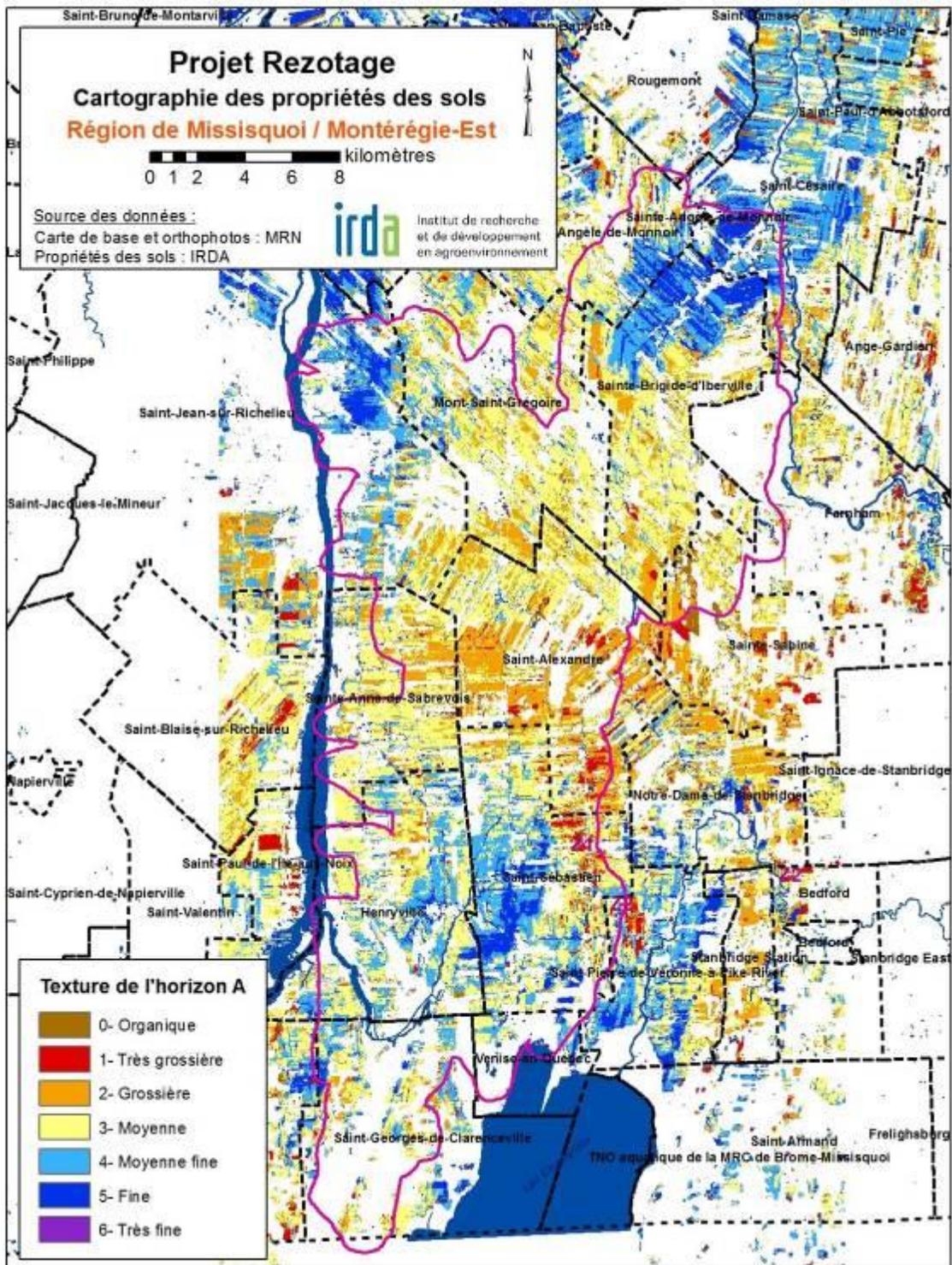


Figure 12. Cartographie des groupes de texture de l'horizon A pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle).

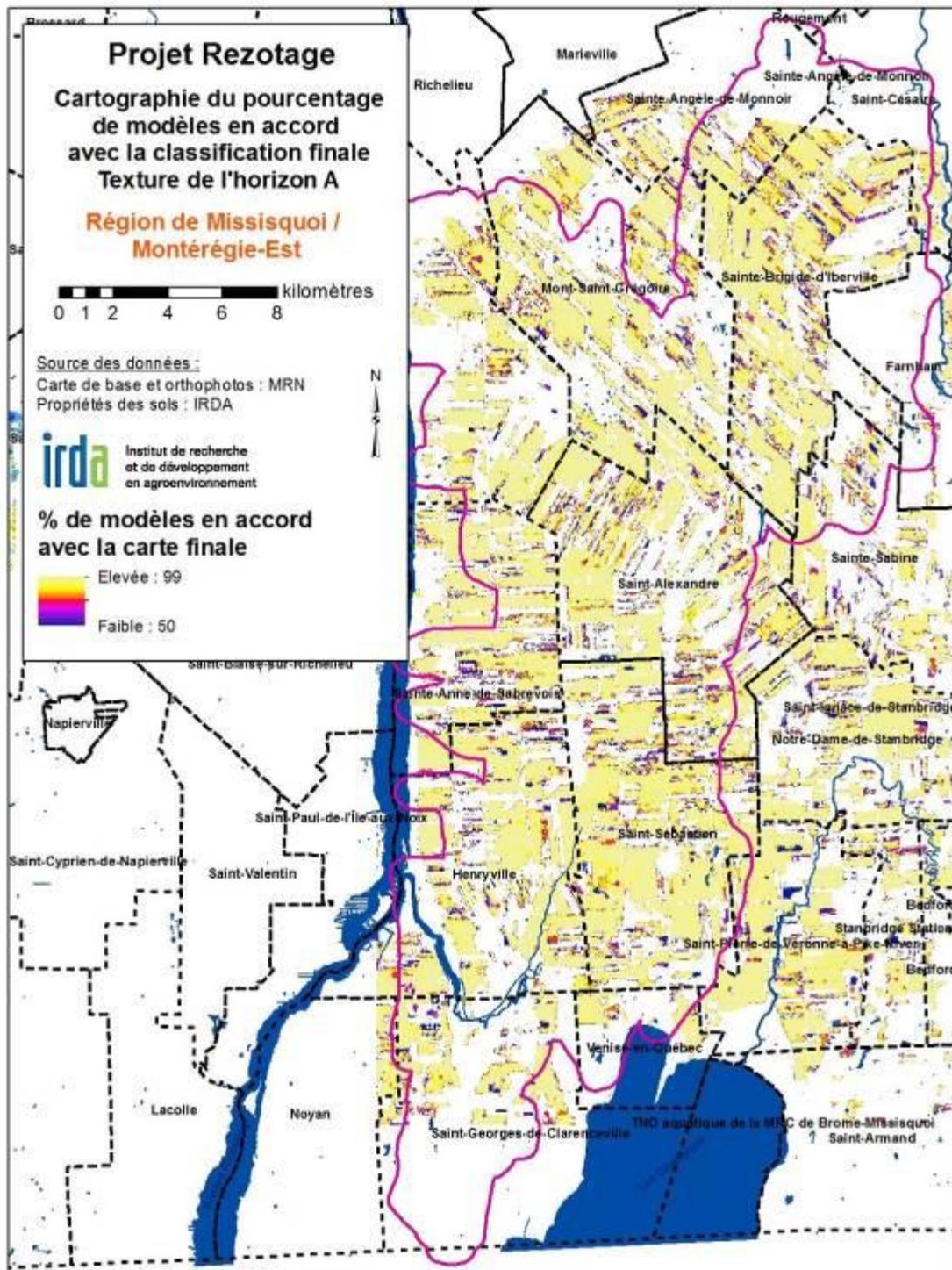


Figure 13. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon A pour la région de Missisquoi.

A l'instar des résultats de prédictions pour l'horizon A, les tableaux 7 à 9 font état des succès de classification de la texture de l'horizon B et les figures 14 et 15 illustrent respectivement la classification finale de la texture de l'horizon B et le pourcentage de modèles en accord avec cette classification finale. Tel qu'anticipé, les succès de classification par classe unique de texture de l'horizon B (60 %) sont légèrement plus faibles que ceux de l'horizon A (63 %). Il est en effet prévisible que les images satellitaires permettent de mieux représenter ce qui se passe à la surface du sol qu'en profondeur. Les textures plus grossières demeurent plus difficiles à prédire correctement, alors que les classes texturales plus lourdes no. 3, 4, 5, et 6 ont des succès de classification supérieurs à 55 % (perspective du producteur). Sur la base d'une tolérance de plus ou moins une classe, le succès global passe à 73 %. Ce succès global inférieur à celui de la couche arable (80 %) témoigne d'un nombre de classes d'écart plus grand pour l'horizon B.

**Tableau 7. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

Groupe de texture de l'horizon B - OBSERVATIONS	Groupe de texture de l'horizon B - PRÉDICTIONS							
	0	1	2	3	4	5	6	
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	1	0	1	2	0	0	
2	0	0	3	0	3	0	2	
3	0	0	1	5	2	1	0	
4	0	2	1	3	10	1	0	
5	0	0	2	0	0	4	0	
6	0	0	0	1	2	1	15	

N =63 / Succès global : 60,3 %

**Tableau 8. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

	Groupe de texture de l'horizon B						
	0	1	2	3	4	5	6
Succès en pourcentage	-	25	37,5	55,6	58,8	66,7	78,9

**Tableau 9. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

	Groupe de texture de l'horizon B						
	0	1	2	3	4	5	6
Succès en pourcentage	-	33,3	42,9	50	52,6	57,1	88,2

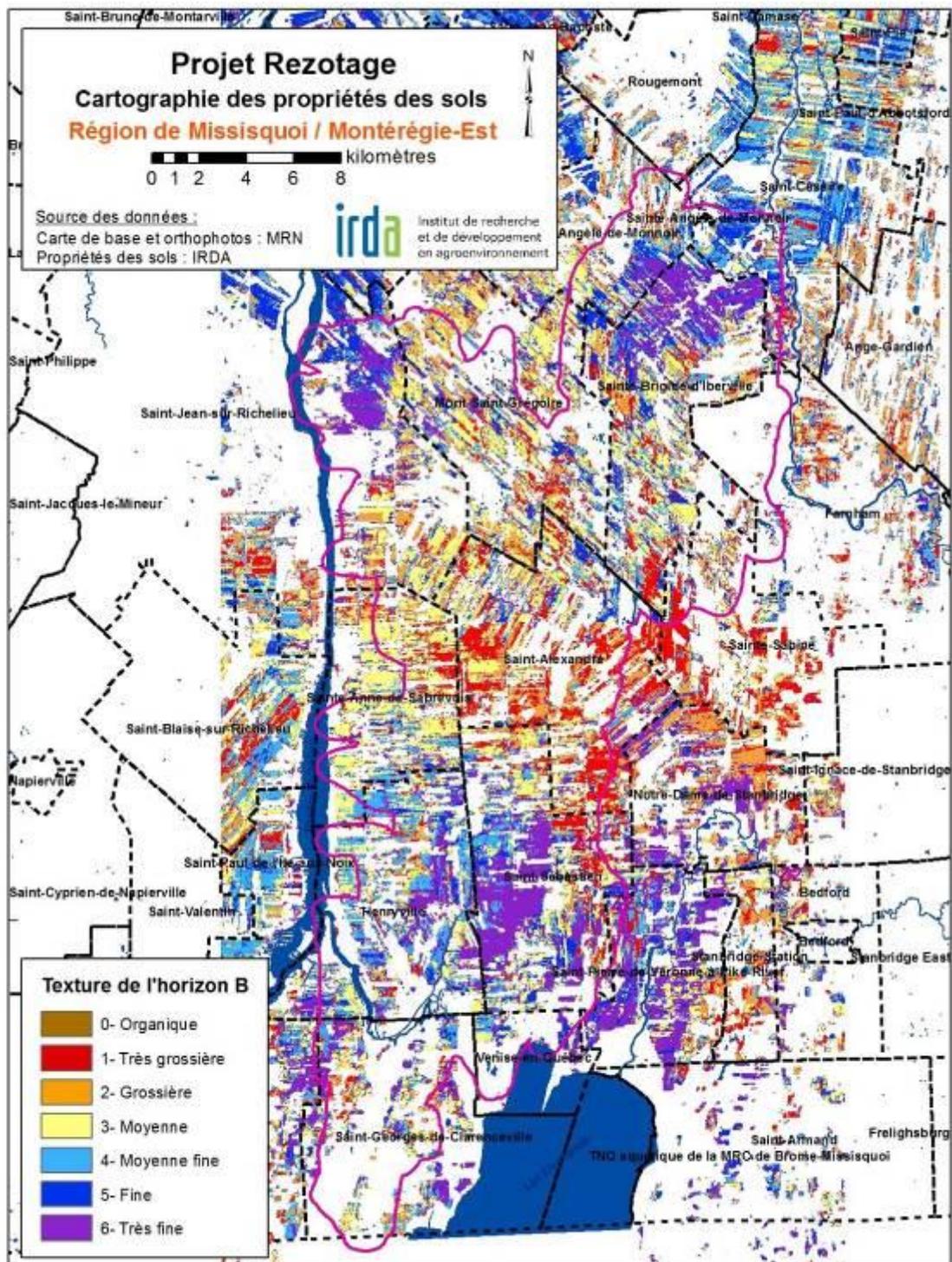


Figure 14. Cartographie des groupes de texture de l'horizon B pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle).

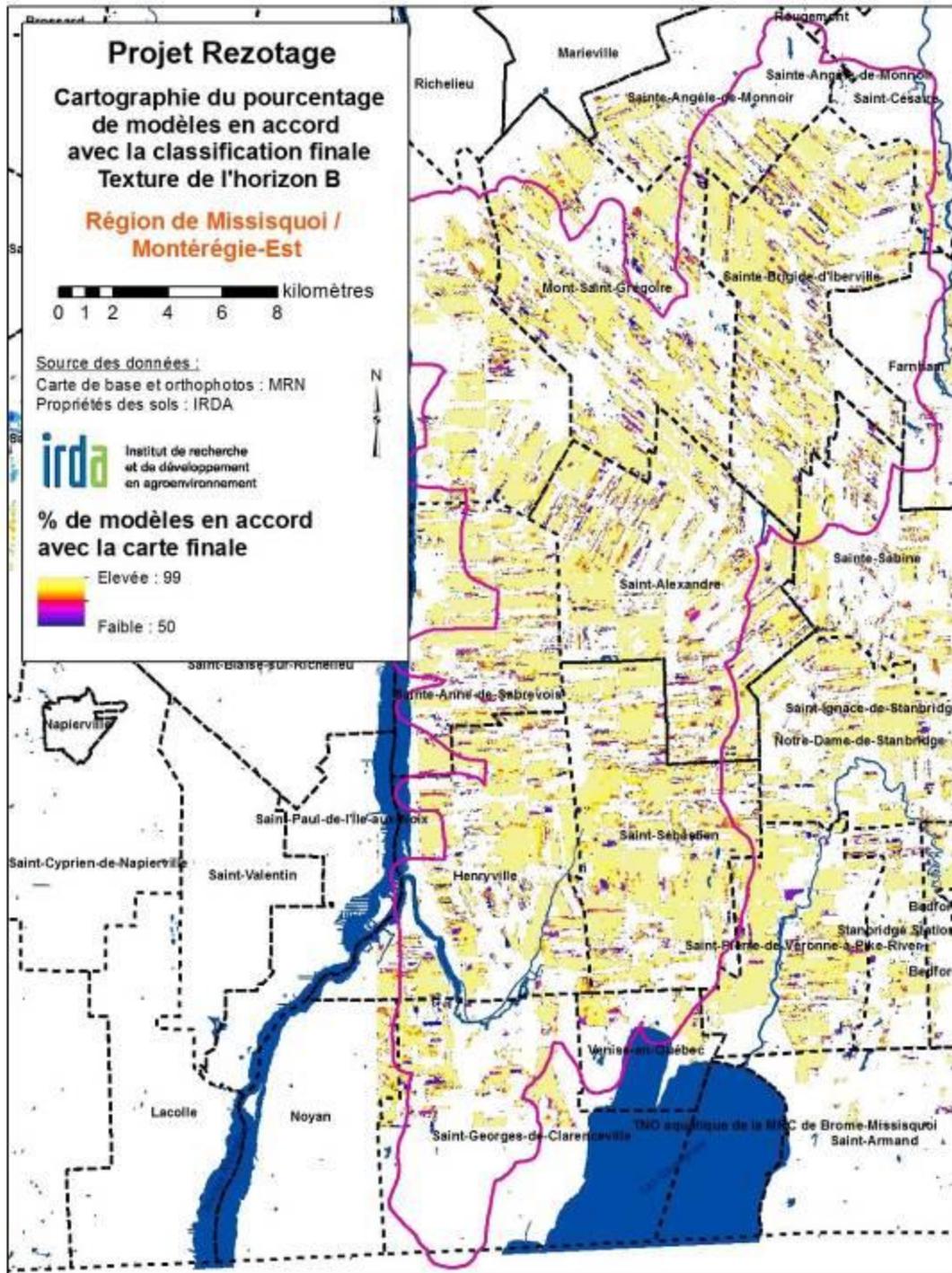


Figure 15. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon B pour la région de Missisquoi.

Enfin, les tableaux 10 à 12 présentent la matrice de confusion ainsi que les succès de classification (selon les deux perspectives) pour le drainage des sols. Les figures 16 et 17, quant à elles, présentent la cartographie finale des classes de drainage des sols et le pourcentage d'accord des modèles avec la classification finale. Sur cette seconde carte, nous remarquons, contrairement aux autres propriétés, une zone plus marquée avec un pourcentage d'accord plus faible tournant autour de 75 %. Cette zone se situe au centre-sud de la région. Cela semble correspondre sur la carte pédologique à une zone d'argile Sainte-Rosalie, et à des textures plus fines sur les cartes de texture des horizons A et B. Les succès de classification des classes de drainage des sols demeurent néanmoins très élevés, reflétant la faible variabilité de ces classes à l'intérieur de la région de Missisquoi. En effet, la classe de drainage 6 (Mal drainé) est dominante, alors que la classe 5 (Imparfaitement drainé) est faiblement représentée. Les autres classes sont peu présentes, au point où elles n'ont été que très rarement prédites. La portion de 30 % des données morphologiques servant à la validation ne contenait pas de classes de drainage autres que les classes 5 et 6. L'évaluation de la prédiction des autres classes n'a donc pu être réalisée. Notons également que les succès de prédiction de la classe 6 (classe la plus représentée) sont beaucoup plus élevés que ceux de la classe 5.

**Tableau 10. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

Classes de drainage - OBSERVATIONS	Classes de drainage - PRÉDICTIONS	
	5	6
5	3	5
6	0	37

N = 45 / Succès global : 88,9 %

**Tableau 11. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective du producteur) pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

Succès en pourcentage	Classes de drainage	
	5	6
	37,5	100

**Tableau 12. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective de l'utilisateur) pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

Succès en pourcentage	Classes de drainage	
	5	6
	100	88,1

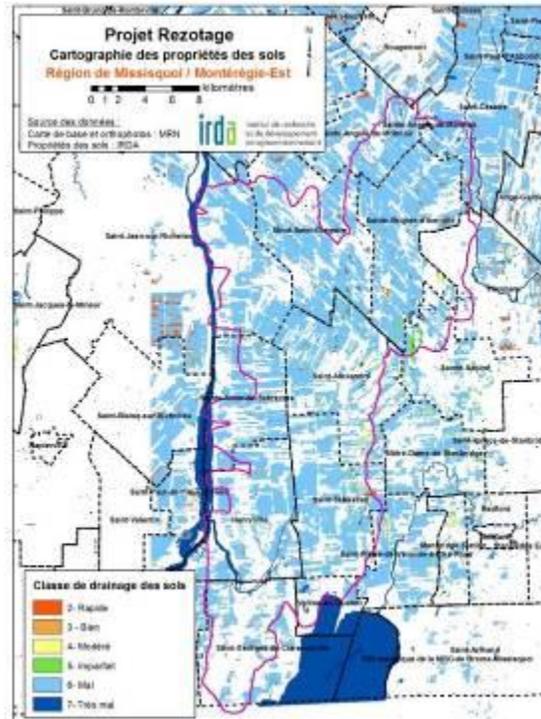


Figure 16. Cartographie des classes de drainage pour la région de Missisquoi (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle).

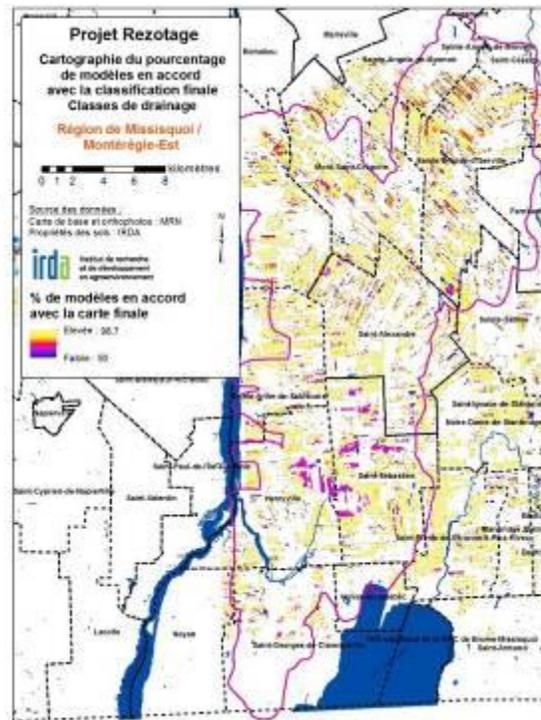


Figure 17. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des classes de drainage pour la région de Missisquoi.

Une seconde validation des données a été réalisée à partir des résultats de dosages des propriétés des sols réalisés en laboratoire sur les échantillons prélevés lors de campagnes de terrain. Ces données n'ont pas été utilisées lors de la création du modèle et permettent donc de réaliser une seconde validation. Celle-ci a été réalisée à la fois sur la première classification (manuelle) (tableaux 13, 15 et 17) ainsi que sur la seconde (classification automatisée) (tableaux 14, 16 et 18). La seconde classification ne semble pas plus performante pour la texture de l'horizon A, toutefois, l'amélioration est notable pour la prédiction de la texture de l'horizon B. Aussi, les pourcentages de succès sont légèrement plus faibles pour cette seconde validation réalisée à partir des données analytiques (laboratoire), comparativement aux succès estimés sur la base des observations morphologiques (observation terrain). Ces différences témoignent vraisemblablement de la différence dans les précisions des deux sources de données.

**Tableau 13. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification manuelle).**

		Prédictions						% succès	% succès avec + ou - 1 classe
		1	2	3	4	5	6		
Observations	1	2	1					67	100
	2	2	8	8	1	2		38	86
	3	1	6	19	3			66	97
	4			2	7	2		64	100
	5				2	9		82	100
	6								
N=75							<i>Succès global</i>	60	95

**Tableau 14. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

		Prédictions						% de succès	% de succès avec + ou - 1 classe
		1	2	3	4	5	6		
Observations	1	1	2					33,3	100
	2	2	9	3	1	1		56,3	87,5
	3		2	11	3			68,8	100
	4			3	7	2		58,3	100
	5			1	3	3		42,9	85,7
	6								
N=54							<i>Succès global</i>	57,4	94,4

Tableau 15. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification manuelle).

	Prédications						% de succès	% succès avec + ou - 1 classe			
	0	1	2	3	4	5			6		
Observations	0										
	1	5	6					55	100		
	2	3	3	1	3	1		1	8	58	
	3	2	1	1	3	4		1	25	67	
	4	1			1	2	2		33	83	
	5			1			2		4	29	86
	6	1			1	1	3		1	14	57
N=55						<i>Succès global</i>	27	65			

Tableau 16. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).

	Prédications						% de succès	% de succès avec + ou - 1 classe		
	1	2	3	4	5	6				
observations	1	10		1	1			83,3	83,3	
	2	2	4	3	1			40	90	
	3	1	2	1	1	1		1	28,6	57,1
	4				4	2			66,7	100
	5	1		1	1	0		4	0	71,4
	6						2		5	71,4
N=49						<i>Succès global</i>	49	83,7		

Tableau 17. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification manuelle).

	Prédications					% succès	% succès + ou - 1 cl.		
	3	4	5	6	7				
Observations	3				3		0	0	
	4		3	3			50	100	
	5			15	22		41	100	
	6			10	121		6	88	100
	7								
N=183					<i>Succès global</i>	76	98		

**Tableau 18. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de Missisquoi (résultats de la classification automatisée).**

		Prédictions				% de succès	% de succès avec + ou - 1 classe	
		3	4	5	6			
Observations	3	0	3			0	100	
	4		6			100	100	
	5			3		12	20	100
	6			6		83	93,3	100
N=113		<i>Succès global</i>				<i>81,4</i>	<i>100</i>	

#### 2.1.1.6.2. Résultats de prédiction dans la région de l'Esturgeon

Les résultats suivants concernent la région de l'Esturgeon en Montérégie Ouest. Les tableaux 19 à 21 présentent la matrice de confusion, les succès de classification du producteur (producer's accuracy) par groupe de texture et les succès de classification de l'utilisateur (user's accuracy) par groupe de texture pour l'horizon A. Le succès global de prédiction des textures de l'horizon A pour la région de l'Esturgeon (65%) est du même ordre que pour la région de Missisquoi (63%), ce qui témoigne d'une constance du modèle malgré son application à différentes régions ayant des sols différents. Par groupe de texture, selon la perspective du producteur, le succès de classification est de 50 % et plus pour tous les groupes à l'exception du groupe 2 (texture grossière), pour lequel le succès est plutôt de 21 %. Effectivement, un nombre important de pixels ont été prédits comme appartenant au groupe 3 (texture moyenne) alors que les observations témoignent de la présence de textures grossières. Le succès de classification de l'horizon A si l'on accepte une marge de plus ou moins une classes se situe à 97,7 %, ce qui est plus élevé que pour la région de Missisquoi. Les sols légèrement plus homogènes dans la région de l'Esturgeon pourraient expliquer en partie ce succès. Avec plus ou moins une classe, les succès par classe du producteur sont plutôt de 89 % pour la classe 2, 99 % pour les classes 3 et 4, et 100 % pour la classe 5.

**Tableau 19. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

		Groupe de texture de l'horizon A - PRÉDICTIONS						
		0	1	2	3	4	5	6
Groupe de texture de l'horizon A - OBSERVATIONS	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	1	0	1	0	0	0
	2	0	0	12	39	5	1	0
	3	0	0	6	177	33	2	0
	4	0	0	1	46	132	22	0
	5	0	0	0	3	35	38	0
	6	0	0	0	0	0	3	0

N = 557 / Succès global : 64,6 %

**Tableau 20. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

	Groupe de texture de l'horizon A						
	0	1	2	3	4	5	6
<b>Succès en pourcentage</b>	-	50	21,1	81,2	65,7	50	-

**Tableau 21. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

	Groupe de texture de l'horizon A						
	0	1	2	3	4	5	6
<b>Succès en pourcentage</b>	-	100	63,2	66,5	64,4	57,6	0

La figure 18 illustre les résultats de la cartographie finale de la texture du A. Pour cette carte les deux classifications (manuelle et automatisée) ont été combinées afin de couvrir le plus de territoire possible. La seconde classification réalisée à partir des 100 itérations est superposée (à prépondérance sur) à la classification manuelle. On remarque, pour la région de l'Esturgeon, la capacité du modèle à bien identifier les sols organiques (ou terres noires) situés à l'est de la zone à l'étude. Enfin, la figure 19 présente pour l'ensemble des 100 modèles (itérations) de la classification automatisée, le pourcentage de modèles qui ont prédit la même valeur que le modèle final. Globalement, tout comme pour la région de Missisquoi, les modèles semblent constants dans la prédiction de la texture de l'horizon A, le pourcentage d'accord se rapprochant de 99 sur de grandes superficies. Seuls de petits secteurs ont des pourcentages d'accord entre les modèles davantage près de 75 %, secteurs identifiables par les couleurs autour du rose. On retrouve également quelques petites sections à l'ouest de la région où les pourcentages d'accord voisinent les 50 %.

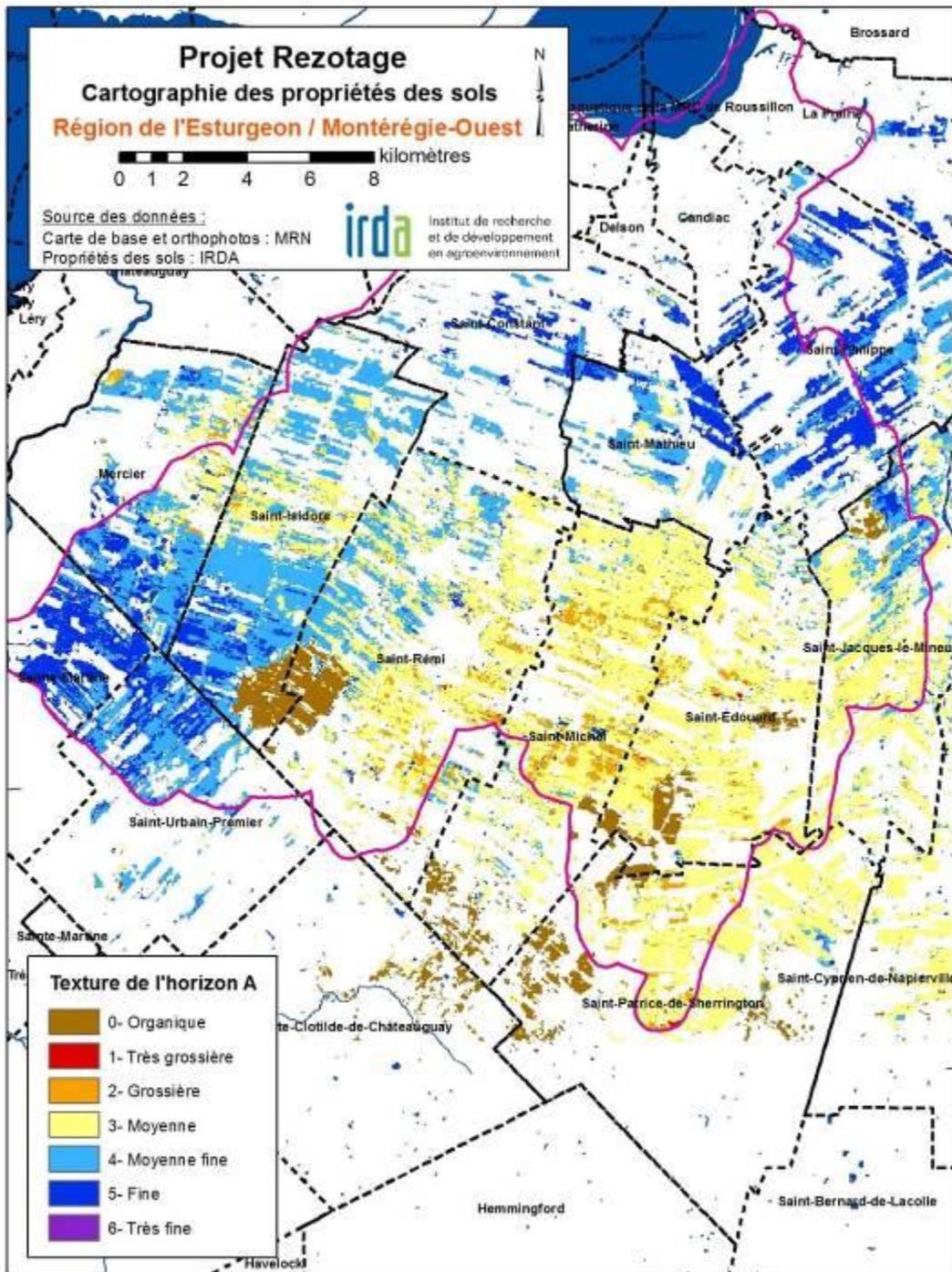


Figure 18. Cartographie des groupes de texture de l'horizon A pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle).

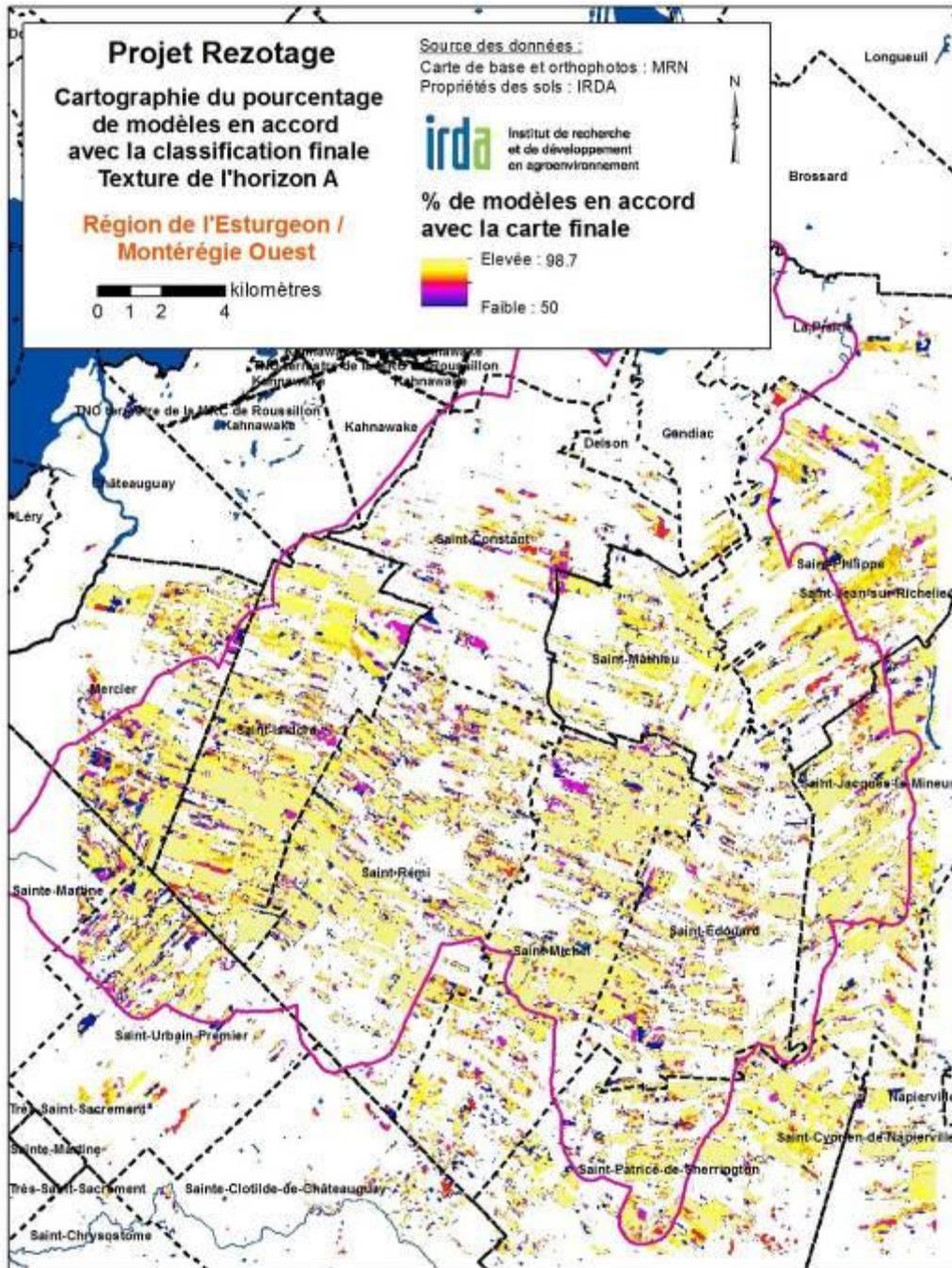


Figure 19. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon A pour la région de l'Esturgeon.

Tout comme pour l'horizon A, les mêmes tableaux et figures ont été produits pour la texture de l'horizon B ainsi que pour la classe de drainage des sols. Les tableaux 22 à 24 font état des succès de classification de la texture de l'horizon B et les figures 20 et 21 illustrent respectivement la classification finale de la texture de l'horizon B et le pourcentage de modèles en accord avec cette classification finale. Tout comme pour la texture du A, la carte de la texture du B montre une différenciation marquée des textures à l'intérieur de la région. Les sols de l'ouest et du nord-est ont des textures plus fines, tandis que la zone au centre-sud de la région est composée de sols à texture plus grossière. Toutefois, notons que les champs sélectionnés à l'intérieur de cette région pour le volet agronomique du projet se situaient davantage dans les secteurs à texture plus fine et ne présentaient donc pas une grande variabilité de textures. Les résultats de constance entre les modèles présentés à la figure 21 révèlent tout comme pour la texture du A, une majorité de zones avec un fort pourcentage de modèles en accord avec la carte finale. Toutefois, les zones avec des pourcentages d'accord plus faibles sont localisées à des endroits différents pour les horizons A et B. Les résultats de la prédiction de la texture de l'horizon B sont quelque peu plus faibles dans l'Esturgeon que dans Missisquoi, mais se sont avérés toute de même concluants puisque le succès global de classification est de 55 % pour l'horizon B. Tout comme pour la région de Missisquoi, les résultats de succès de classification par groupe de texture témoignent d'une plus grande difficulté de prédiction des textures plus grossières. La représentativité de ces groupes de texture peut toutefois expliquer en partie ce résultat puisque les groupes 1 et 2 sont peu présents dans les régions à l'étude. Pour la texture de l'horizon B, les succès de classification (avec plus ou moins une classe de différence) selon la perspective du producteur sont plutôt de 40 % pour la classe 1, 57 % pour la classe 2, 91 % pour la classe 3, 89 % pour la classe 4, 93 % pour la classe 5, et 91 % pour la classe 6.

**Tableau 22. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

		Groupe de texture de l'horizon B - PRÉDICTIONS						
		0	1	2	3	4	5	6
Groupe de texture de l'horizon B – OBSERVATIONS	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	9	3	8	9	1	0
	2	0	4	20	11	21	4	1
	3	1	0	5	36	19	4	1
	4	1	3	9	19	87	30	3
	5	1	1	1	6	29	75	15
	6	1	0	0	1	7	22	67

N = 535 / Succès global : 54,9 %

**Tableau 23. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

	Groupe de texture de l'horizon B						
	0	1	2	3	4	5	6
Succès en pourcentage	-	30	32,7	54,5	57,2	58,6	68,4

**Tableau 24. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

	Groupe de texture de l'horizon B						
	0	1	2	3	4	5	6
<b>Succès en pourcentage</b>	0	52,9	52,6	44,4	50,6	55,1	77

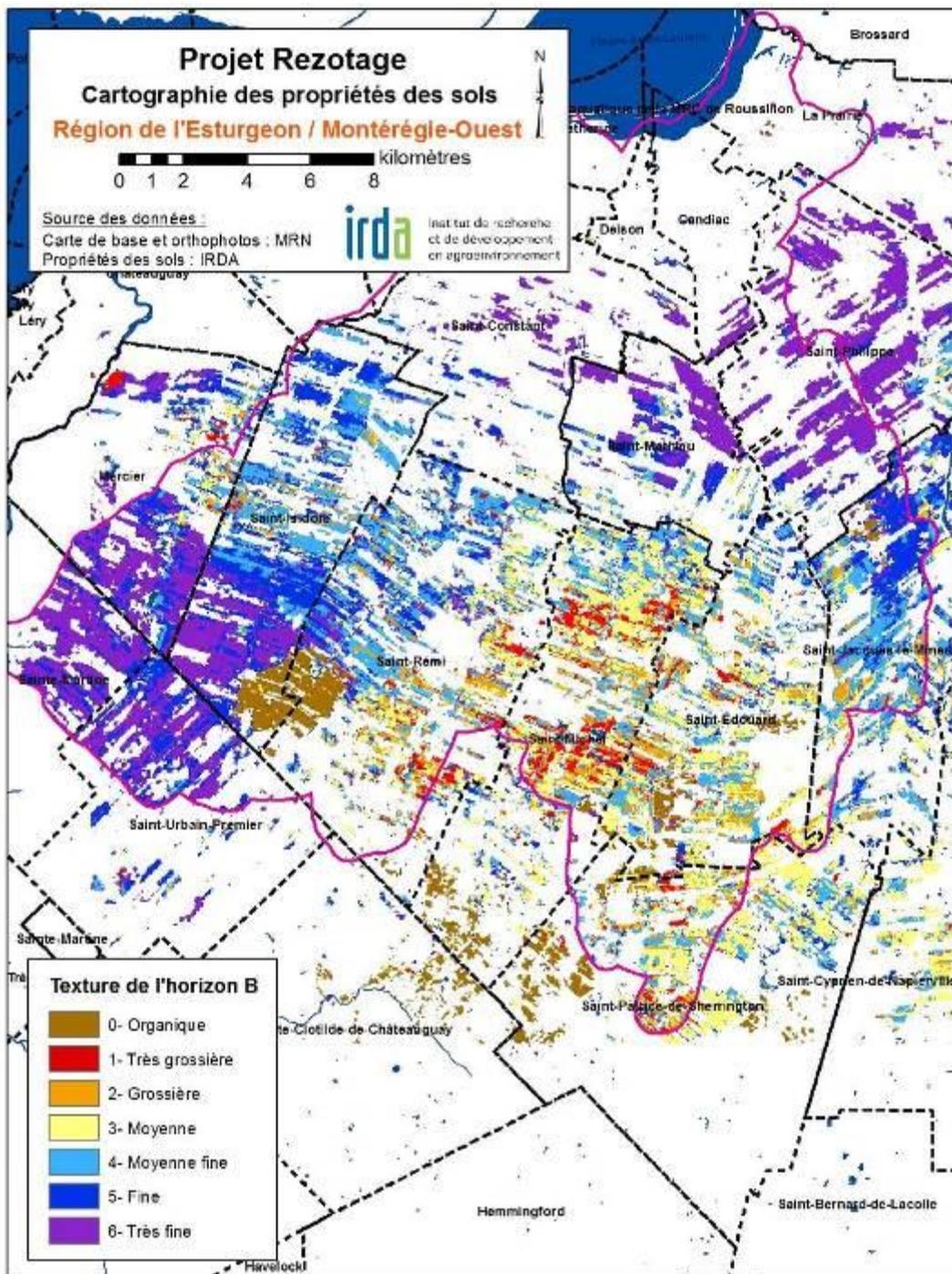


Figure 20. Cartographie des groupes de texture de l'horizon B pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle).

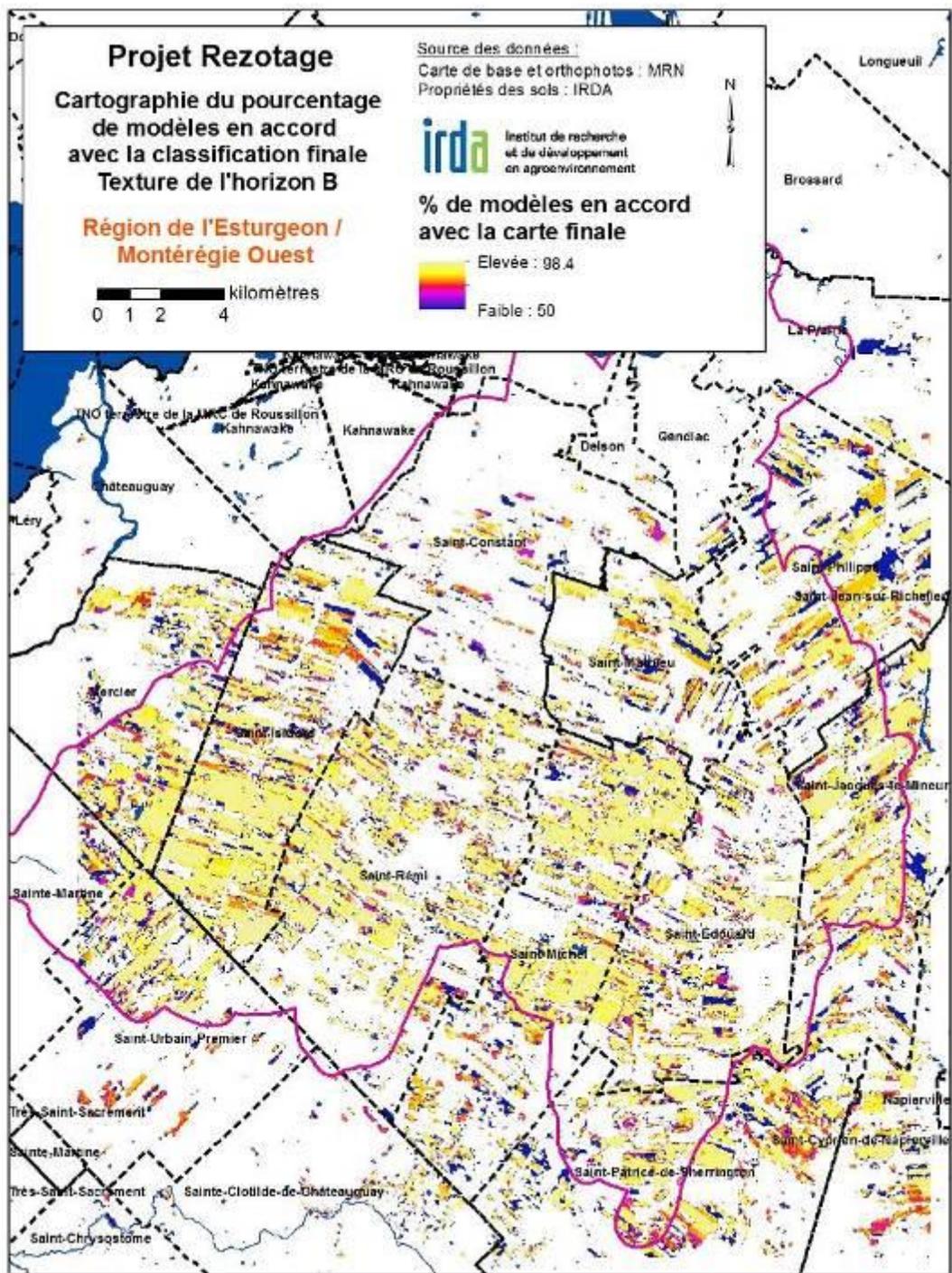


Figure 21. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon B pour la région de l'Esturgeon.

Enfin, les tableaux 25 à 27 présentent la matrice de confusion ainsi que les succès de classification (selon les deux perspectives) pour le drainage des sols. Les figures 22 et 23, quant à elles, présentent respectivement la cartographie finale des classes de drainage des sols et le pourcentage d'accord des modèles avec la classification finale. Les succès de classification des classes de drainage des sols sont très élevés, toutefois il existe peu de variabilité de ces classes à l'intérieur de la région de l'Esturgeon. Par contre, notons contrairement à la région de Missisquoi des classes de drainage 3, 4 et 7 dans les données morphologiques de validation. La présence d'une plus grande variabilité des classes permet d'avoir une meilleure validation (tenant compte de l'ensemble des classes de drainage de sol). Selon la perspective de l'utilisateur, les succès de classification des classes 4 et 7 se sont même avérés supérieurs à la classe 6, laquelle est la classe dominante.

**Tableau 25. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

		Classes de drainage - PRÉDICTIONS				
Classes de drainage - OBSERVATIONS		3	4	5	6	7
3		1	0	0	1	0
4		1	2	0	2	0
5		0	0	2	44	0
6		0	0	2	574	2
7		0	0	0	5	23

N = 659 / Succès global : 91,4 %

**Tableau 26. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective du producteur) pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

		Classes de drainage				
Succès en pourcentage		3	4	5	6	7
		50	40	4,3	99,3	82,1

**Tableau 27. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective de l'utilisateur) pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

		Classes de drainage				
Succès en pourcentage		3	4	5	6	7
		50	100	50	91,7	92

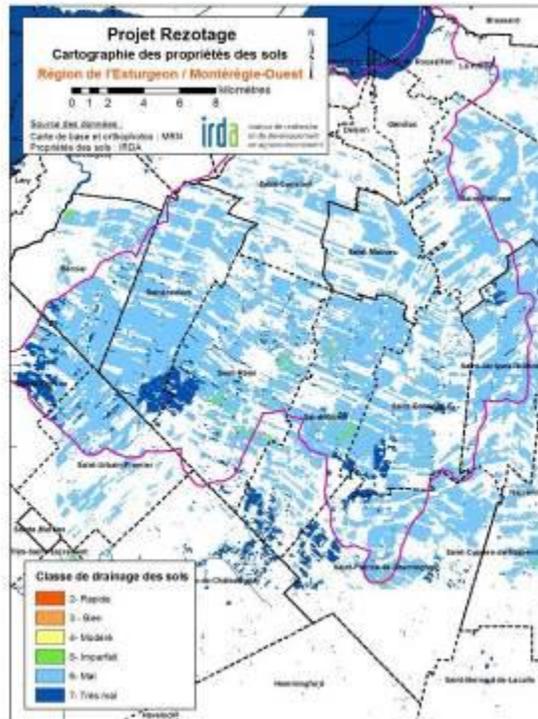


Figure 22. Cartographie des classes de drainage pour la région de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle).

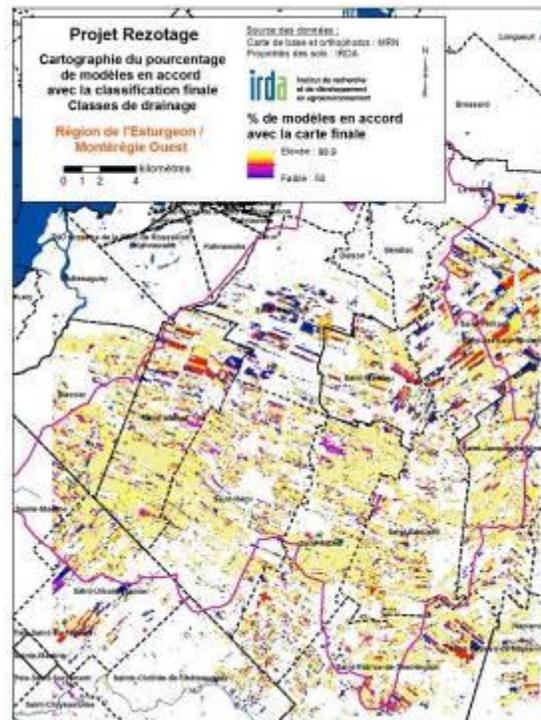


Figure 23. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des classes de drainage pour la région de l'Esturgeon.

La seconde validation des prédictions réalisée à partir des données analytiques des profils de sol a été réalisée à la fois sur la première classification (dite manuelle) (tableaux 28, 30, 32) et la seconde (dite automatisée) (tableaux 29, 31, 33). Contrairement, à la région de Missisquoi, la seconde classification n'a pas permis, dans le cas de l'Esturgeon, d'améliorer le succès de classification de la texture de l'horizon B. Elle a par contre permis l'amélioration du succès de classification des classes de drainage des sols, bien que les succès pour cette dernière région soient quelque peu moins probants que pour Missisquoi.

**Tableau 28. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification manuelle).**

		Prédictions				% de succès	% de succès avec + ou - 1 classe
		2	3	4	5		
Observations	2	3	4	2		33	78
	3	3	20	7	1	65	97
	4		4	5		56	100
	5		2	1	1	25	75
N=53		<i>Succès global</i>				<i>54,7</i>	<i>90,5</i>

**Tableau 29. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

		Prédictions					% de succès	% de succès avec + ou - 1 classe
		2	3	4	5	6		
Observations	2	0	7	4			0	58,3
	3	4	25	8			67,6	100
	4		11	15			57,7	100
	5		1	1	3		60	66,7
	6					2	0	0
N=81		<i>Succès global</i>					<i>53,1</i>	<i>93,8</i>

**Tableau 30. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification manuelle).**

		Prédictions					% de succès	% succès avec + ou - 1 classe	
		1	2	3	4	5			6
Observations	1	1		1	2		25	25	
	2	1	2		1		50	75	
	3			2	4		29	86	
	4				3	1	75	100	
	5				2	1	1	25	75
	6							-	-
N=22		<i>Succès global</i>					<i>40,9</i>	<i>72,7</i>	

**Tableau 31. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

		Prédications						% de succès	% de succès avec + ou - 1 classe
		1	2	3	4	5	6		
Observations	1		1	1	2	1		0	20
	2		2		3	2		28,6	28,6
	3			1	7			11,1	88,9
	4				4	1		80	100
	5				1	2		50	100
	6						1	66,7	100
N=33							<i>Succès global</i>	33,3	69,7

**Tableau 32. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification manuelle).**

		Prédications					% succès	% de succès avec + ou - 1 classe
		3	4	5	6	7		
Observations	3							
	4	3					0	100
	5	1		2	10	9	9	55
	6			3	43		13	73
	7				4		12	75
N= 100						<i>Succès global</i>	57	90

**Tableau 33. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de l'Esturgeon (résultats de la classification automatisée).**

		Prédications				% de succès	% de succès avec + ou - 1 classe
		4	5	6	7		
Observations	4	0	1	11		0	8,3
	5		0	40		0	100
	6		4	98		96,1	100
	7				6	7	53,8
N=167					<i>Succès global</i>	62,8	93,4

#### 2.1.1.6.3. Résultats de prédiction dans la région de la Baie Lavallière

La région d'étude de la Baie Lavallière a fait l'objet des mêmes prédictions des propriétés des sols que les deux régions présentées précédemment, suivant les mêmes méthodes. Contrairement, aux deux autres régions, le nombre de données morphologiques disponibles pour

la validation des prédictions des propriétés de sol de la région de la Baie Lavallière était beaucoup plus restreint (N=10). Les tableaux 34 à 36 illustrent, pour l'horizon A, la matrice de confusion, les succès de classification du producteur (producer's accuracy) par groupe de texture et les succès de classification de l'utilisateur (user's accuracy) par groupe de texture. La première validation des prédictions s'avère donc plus hasardeuse, d'où l'importance de la réalisation de la seconde validation appuyé par les données analytiques. Il s'avère, par contre, que les deux validations pour la prédiction de la texture de l'horizon A ne sont pas du même ordre. Le succès étant beaucoup plus probant pour la première que pour la deuxième validation. Le succès global de prédiction pour cette propriété si l'on compare aux données morphologiques est de près de 78 %; et en acceptant une marge de plus ou moins une classe le succès passe à 100 %.

**Tableau 34. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).**

Groupe de texture de l'horizon A - OBSERVATIONS	Groupe de texture de l'horizon A - PRÉDICTIONS							
	0	1	2	3	4	5	6	
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	2	0	0	0	0	0	
2	0	0	2	0	0	0	0	
3	0	0	1	2	0	0	0	
4	0	0	0	1	1	0	0	
5	0	0	0	0	0	1	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	

N = 10 / Succès global : 77,8 %

**Tableau 35. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).**

Succès en pourcentage	Groupe de texture de l'horizon A						
	0	1	2	3	4	5	6
-	100	100	66,7	50	-	-	

**Tableau 36. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon A pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).**

Succès en pourcentage	Groupe de texture de l'horizon A						
	0	1	2	3	4	5	6
-	100	66,7	66,7	100	-	-	

La figure 24 illustre les résultats de la cartographie finale de la texture du A. Pour cette carte les deux classifications (manuelle et automatisée) ont été combinées afin de couvrir le plus de territoire possible. La seconde classification réalisée à partir des 100 itérations est superposée avec prépondérance à la classification manuelle. Enfin, la figure 25 présente pour l'ensemble des 100 modèles (itérations), le nombre de modèles qui ont prédit la même valeur que le modèle final. Cette carte permet de localiser les secteurs où la classification est plus certaine (nombre de modèles congruents plus élevés) en comparaison aux secteurs où les modèles sont moins constants dans les valeurs prédites. Tout comme pour les autres régions, les modèles semblent relativement constants dans la prédiction de la texture de l'horizon A, le pourcentage d'accord se

rapprochant de 99 sur de grandes superficies. Seuls de petits secteurs ont des pourcentages d'accord entre les modèles davantage près de 75 %.

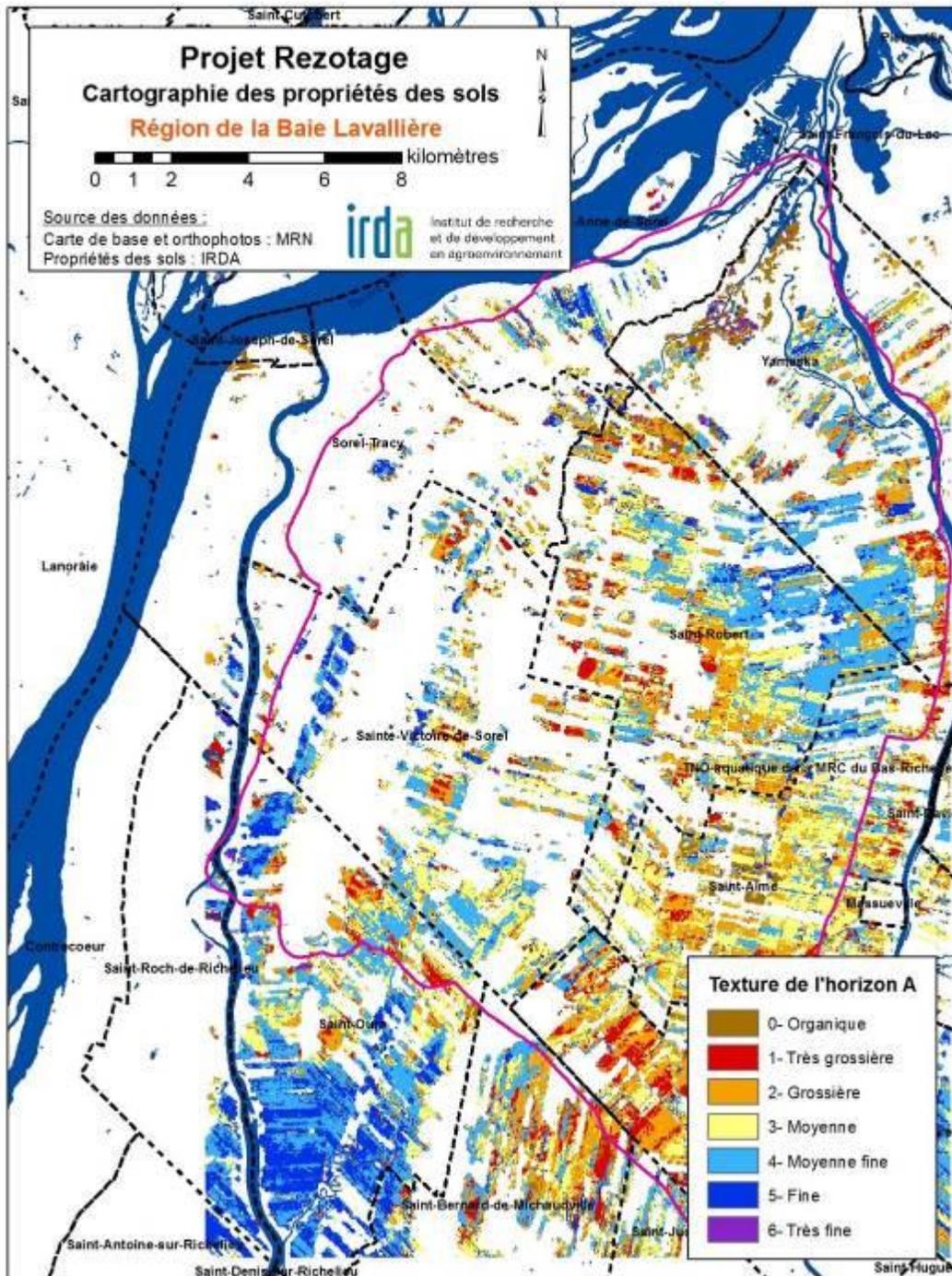


Figure 24. Cartographie des groupes de texture de l'horizon A pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle).

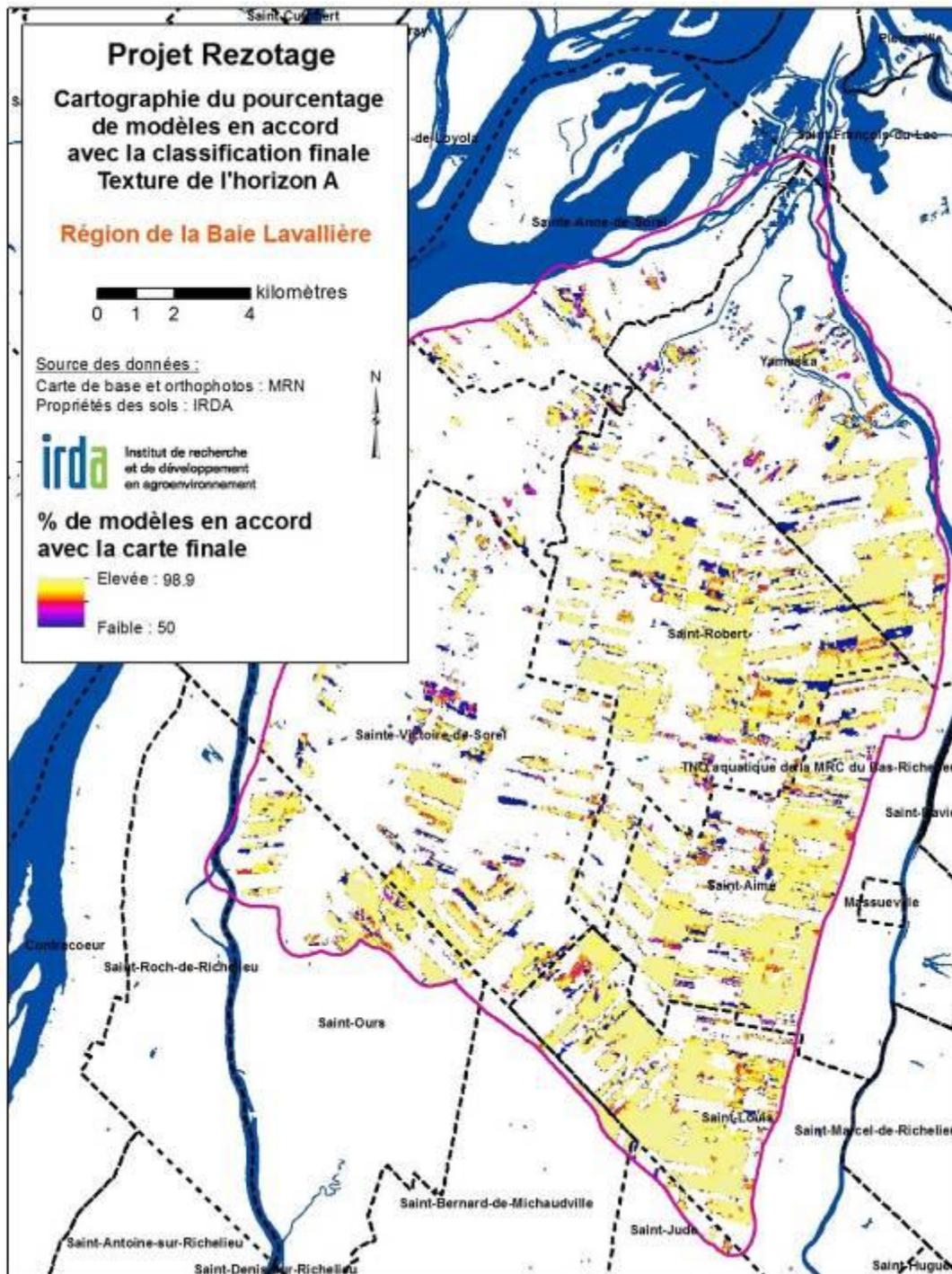


Figure 25. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon A pour la région de la Baie Lavallière.

Les tableaux 37 à 39 font état des succès de classification de la texture de l'horizon B et les figures 26 et 27 illustrent la classification finale de la texture de l'horizon B et le pourcentage de modèles en accord avec cette classification finale. Le pourcentage de succès est de 50 % pour la prédiction de la texture de l'horizon B, mais notons l'utilisation de seulement huit profils de sol pour la validation à partir des données morphologiques. Certains groupes de texture n'avaient pas de profils de sol correspondant pour permettre la validation. Toutefois, la carte de pourcentage d'accord des modèles semble plus homogène et contient des pourcentages très élevés d'accord.

**Tableau 37. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).**

Groupe de texture de l'horizon B - OBSERVATIONS	Groupe de texture de l'horizon B - PRÉDICTIONS							
	0	1	2	3	4	5	6	
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	3	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	1	0	2	1	0	0	
5	0	0	0	0	1	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	

N = 8 / Succès global : 50 %

**Tableau 38. Succès de classification (perspective du producteur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).**

	Groupe de texture de l'horizon B						
	0	1	2	3	4	5	6
Succès en pourcentage	-	100	-	-	25	0	-

**Tableau 39. Succès de classification (perspective de l'utilisateur) par groupe de texture de l'horizon B pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).**

	Groupe de texture de l'horizon B						
	0	1	2	3	4	5	6
Succès en pourcentage	0	75	-	0	50	-	-

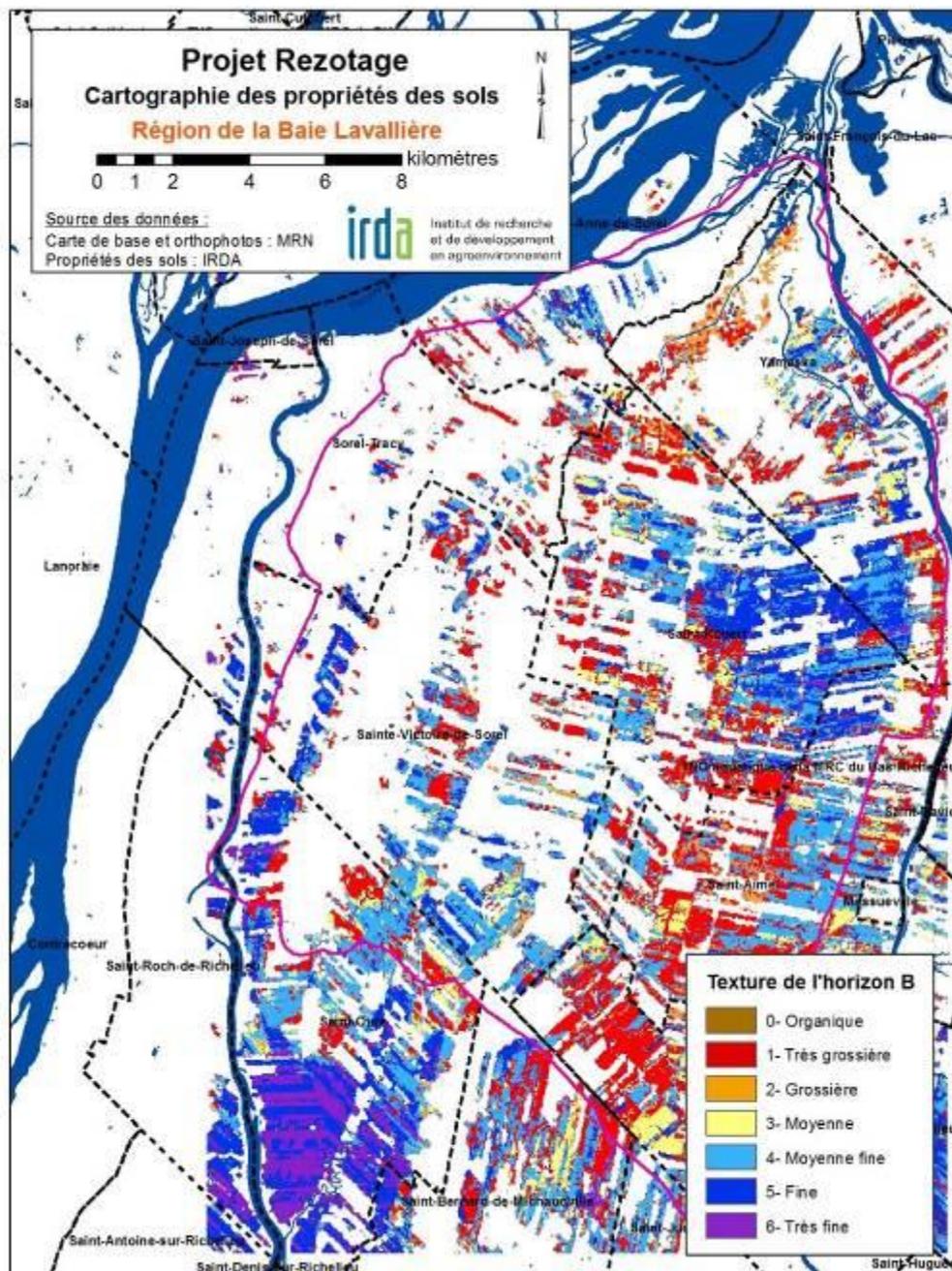


Figure 26. Cartographie des groupes de texture de l'horizon B pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle).

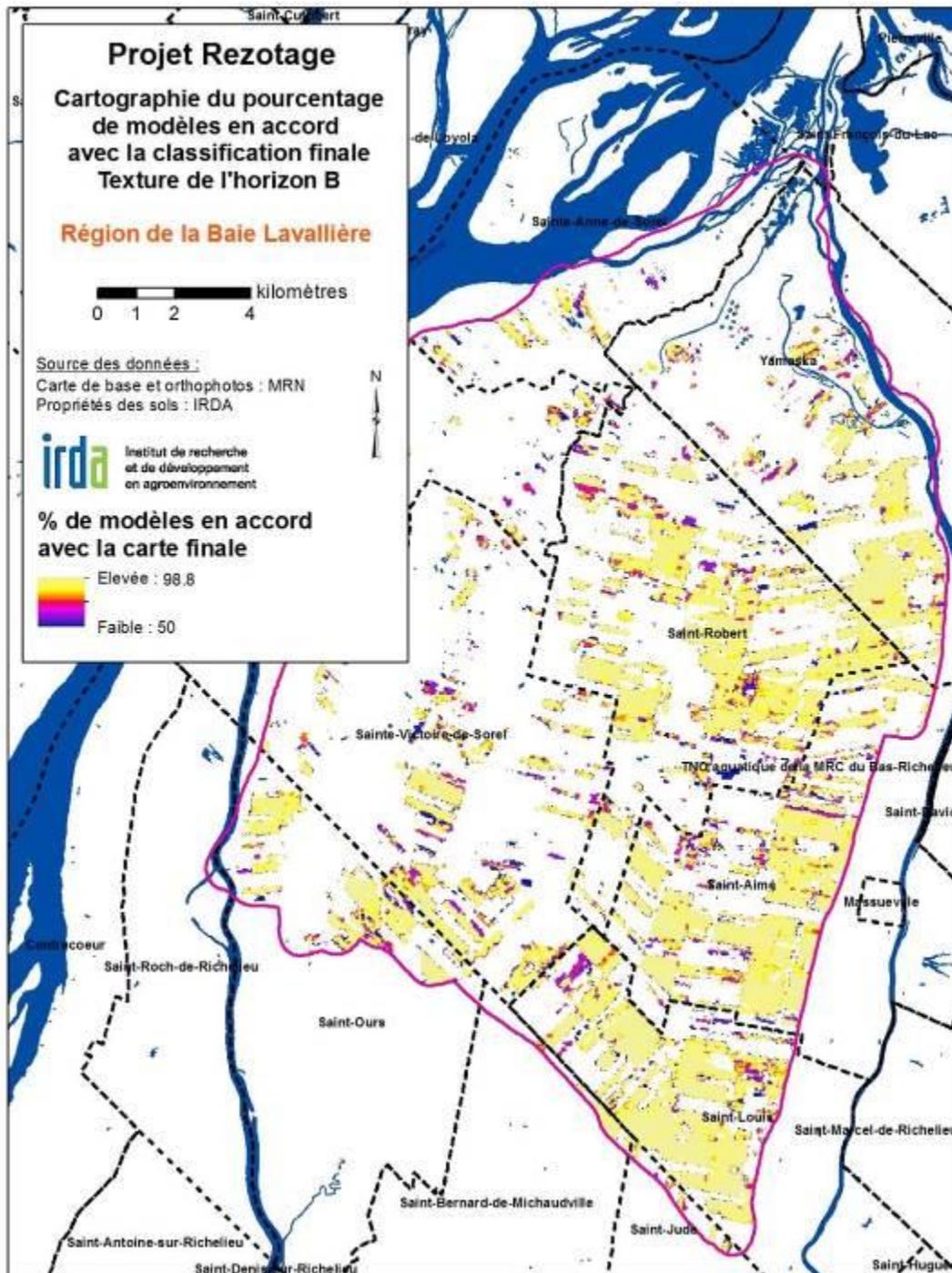


Figure 27. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des groupes de texture de l'horizon B pour la région de la Baie Lavallière.

Enfin, les tableaux 40 à 42 présentent la matrice de confusion ainsi que les succès de classification (selon les deux perspectives) pour le drainage des sols. Les figures 28 et 29, quant à elles, présentent la cartographie finale des classes de drainage des sols et le pourcentage d'accord des modèles avec la classification finale. Les succès de classification des classes de drainage des sols sont très élevés, toutefois il existe très peu de variabilité de ces classes à l'intérieur de la région de la Baie Lavallière ainsi que très peu de données morphologiques pour la validation. Le succès de classification de la classe de drainage 6 est parfait, mais de 0 pour la classe 5 avec une seule valeur de validation.

**Tableau 40. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (correspondant à 30 % des données morphologiques) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).**

		Classes de drainage - PRÉDICTIONS	
Classes de drainage - OBSERVATIONS		5	6
	5	0	1
	6	0	6

N = 7 / Succès global : 85,7 %

**Tableau 41. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective du producteur) pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).**

		Classes de drainage	
Succès en pourcentage		5	6
		0	100

**Tableau 42. Succès de classification exact par classe de drainage (perspective de l'utilisateur) pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).**

		Classes de drainage	
Succès en pourcentage		5	6
		-	85,7

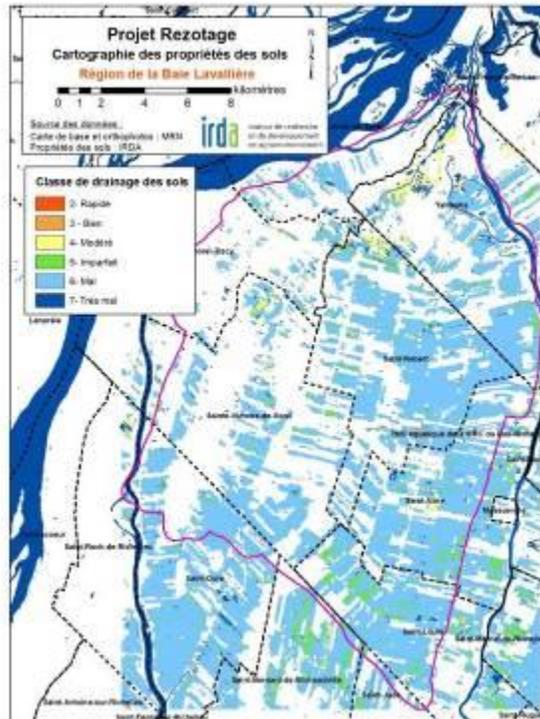


Figure 28. Cartographie des classes de drainage pour la région de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée superposée à celle manuelle).

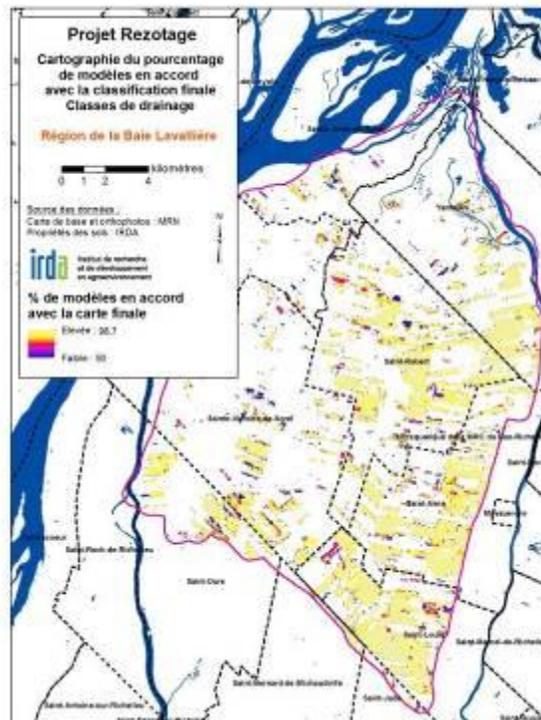


Figure 29. Cartographie du pourcentage de modèles en accord avec la classification finale des classes de drainage pour la région de la Baie Lavallière.

Une seconde validation des données a été réalisée à partir des données analytiques des profils de sol. Ces données de profil de sol, recueillies lors de campagnes de terrain, ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques. Puisque ces données n'ont pas été utilisées dans la création du modèle, elles permettent donc de réaliser une seconde validation. Cette dernière a été réalisée à la fois sur la première classification (tableaux 43, 45, 47) et la seconde (tableaux 44, 46, 48). Le nombre de données analytiques est largement supérieur au nombre de données morphologiques disponibles pour la validation. Toutefois, les succès de prédiction pour les textures des horizons A et B sont plus faibles que pour les autres régions. Lors de la prédiction des propriétés des sols de la Baie Lavallière, les données d'élévation n'ont pas été utilisées dans le modèle de prédiction car elles couvraient une trop petite zone. Cette limitation en données d'élévation peut peut-être expliquer les plus faibles succès de prédiction de ces propriétés des sols. Il serait pertinent, dans de futures études, de valider cette hypothèse en faisant tourner les modèles des deux autres régions sans données d'élévation pour vérifier si cela s'avère constant.

**Tableau 43. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification manuelle).**

		Prédictions						% de succès	% de succès avec + ou - 1 classe
		0	1	2	3	4	5		
Observations	0								
	1	4	16	15	13	11	1		27
	2	2	18	23	49	26	3		19
	3	4	3	9	38	47	2	1	37
	4			7	11	19	10		40
	5	1					1		50
	6								
N=334							<i>Succès global</i>	29	77,8

**Tableau 44. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon A prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon A observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).**

		Prédictions						% de succès	% de succès avec + ou - 1 classe
		1	2	3	4	5	6		
Observations	1	22	13	7	2	1		48,9	77,8
	2	17	26	39	19			25,7	81,2
	3	2	6	29	30	1		42,6	95,6
	4	3	7	2	15	5		46,9	68,8
	5					1		100	100
	6								
N=247							<i>Succès global</i>	37,7	83

**Tableau 45. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification manuelle).**

		Prédictions						% de succès	% succès avec + ou - 1 classe
		1	2	3	4	5	6		
Observations	1	12	1	1	6	1		57	62
	2	6		1				0	100
	3	4			4			0	50
	4				3	9		25	100
	5	1			2	12		80	93
	6						1	100	100
N=64		<i>Succès global</i>						43,8	79,7

Tableau 46. Matrice de confusion comparant les groupes de textures de l'horizon B prédits par le modèle aux groupes de textures de l'horizon B observés (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).

		Prédictions						% de succès	% de succès avec + ou - 1 classe	
		1	2	3	4	5	6			
Observations	1		5		1	3	4		38,5	38,5
	2		1	0	1	1			0	66,7
	3				0	3			0	100
	4					0	5		0	100
	5		1		1		9		81,8	81,8
	6						1	0	0	100
N=36		<i>Succès global</i>						38,9	72,2	

Tableau 47. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la Baie Lavallière (résultats de la classification manuelle).

		Prédictions					% succès	% succès + ou - 1 classe	
		3	4	5	6	7			
Observations	3		3			1		0	75
	4					6	2	0	0
	5		4			8		0	100
	6		5	32	361		11	88	99
	7					3		0	100
N= 436		<i>Succès global</i>					82,8	96,8	

Tableau 48. Matrice de confusion comparant les classes de drainage prédites par le modèle aux classes de drainage observées (données analytiques des profils de sol) pour la zone d'étude de la baie Lavallière (résultats de la classification automatisée).

		Prédictions	% de succès	% de succès avec
--	--	-------------	-------------	------------------

		4	5	6	7		+ ou - 1 classe
Observations	4	0	0	4		0	0
	5		3	5		37,5	100
	6		8	238		96,7	100
	7						
N=258					<i>Succès global</i>	97,1	98,4

En conclusion du volet télédétection, et en introduction à la présentation du volet agronomique du projet ReZoTaGe, le tableau 49 présente les résultats de prédiction de la texture de l'horizon A pour les parcelles retenues dans la réalisation des expérimentations au champ dans le cadre du volet agronomique. Celles-ci sont comparées aux résultats d'analyse en laboratoire sur les échantillons de sol prélevés dans les parcelles à l'étude. Dans l'ensemble, la comparaison des textures prédites à partir de la télédétection avec les résultats en laboratoire reflètent les taux de succès obtenus par la comparaison avec les données morphologiques. Sept des 56 zones de sol caractérisées dans le cadre du volet agronomique du projet n'ont cependant pas pu profiter d'une classification appuyée par la télédétection, compte tenu de la non-disponibilité de données de référence.

Bien que les classifications texturales proposées par l'approche de télédétection soient généralement en accord avec les déterminations en laboratoire, quelques désaccords flagrants sont identifiés. Ceux-ci concernent un site argileux dans le bassin Missisquoi et deux sites dans le bassin de l'Esturgeon. Les textures prédites sont alors systématiquement plus légères que celles déterminées en laboratoire. La matrice de confusion établie pour les observations du bassin de l'Esturgeon reflète ce même biais favorisant un « allègement » des textures les plus lourdes. Malgré l'apparence de ces biais ponctuels observés en sol lourd, l'ajustement des prédictions appuyées par la télédétection avec les déterminations en laboratoire de l'ensemble du réseau d'étude en parcelles expérimentales confirme le pouvoir explicatif des indices développés dans le cadre du projet.

**Tableau 49. Textures de l'horizon A prédites et analysées pour les parcelles à l'étude des régions de Missisquoi, de l'Esturgeon et de la Baie Lavallière**

RÉGION	SITE	Prédiction Texture du A - Code	Prédiction Texture du A -	Analyse de sol 0 - 20 cm - Texture
Missisquoi	2012-DC1 Z1	3 et 2	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon; Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin	Loam
Missisquoi	2012-DC1 Z2	3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Loam
Missisquoi	2012-DC2 Z1	1	Sable grossier, Sable fin, sable très fin, sable grossier loameux, sable loameux, sable fin loameux	Loam sablo-argileux
Missisquoi	2012-DC2 Z2	2 et 1	Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin; Sable grossier, Sable fin, sable très fin, sable grossier loameux, sable loameux, sable fin loameux	Loam argileux
Missisquoi	2012-DC3 Z1	3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Loam sablo-argileux

<b>Missisquoi</b>	2012-DC3 Z2		3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Loam sableux fin
<b>Missisquoi</b>	2012-DC4 Z1	<i>Non couvert</i>		<i>Non couvert</i>	<i>Loam sableux fin</i>
<b>Missisquoi</b>	2012-DC4 Z2	<i>Non couvert</i>		<i>Non couvert</i>	<i>Argile</i>
<b>Missisquoi</b>	2012-DC5 Z1		0	<i>Sols organiques</i>	<i>Donnée manquante</i>
<b>Missisquoi</b>	2012-DC5 Z2	<i>Non couvert</i>		<i>Non couvert</i>	<i>Donnée manquante</i>
<b>Missisquoi</b>	2013-DC1 Z1		2	Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin	Loam sableux
<b>Missisquoi</b>	2013-DC1 Z2		3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Loam sableux fin
<b>Missisquoi</b>	2013-DC2 Z1		3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Loam
<b>Missisquoi</b>	2013-DC2 Z2		3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Loam
<b>Missisquoi</b>	2013-DC3 Z1	<i>Non couvert</i>		<i>Non couvert</i>	<i>Loam sableux</i>
<b>Missisquoi</b>	2013-DC3 Z2		3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Loam
<b>Missisquoi</b>	2013-DC4 Z1		3 et 2	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon; Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin	Argile
<b>Missisquoi</b>	2013-DC4 Z2		2	Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin	Argile
<b>Missisquoi</b>	2013-DC5 Z1		2 et 1	Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin; Sable grossier, Sable fin, sable très fin, sable grossier loameux, sable loameux, sable fin loameux	Loam argileux
<b>Missisquoi</b>	2013-DC5 Z2		5	Argile sableuse, Argile limoneuse, Argile	Argile
<b>Esturgeon</b>	2012-MT23 Z1		3 4	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon; Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Argile limoneuse
<b>Esturgeon</b>	2012-MT23 Z2		3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Argile limoneuse
<b>Esturgeon</b>	2012-MT24 Z1		4 3	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux; Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Argile lourde
<b>Esturgeon</b>	2012-MT24 Z2		4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Argile lourde
<b>Esturgeon</b>	2012-PG31 Z1		4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Argile
<b>Esturgeon</b>	2012-PG31 Z2		4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Argile lourde
<b>Esturgeon</b>	2012-PG32 Z1	<i>Non couvert</i>		<i>Non couvert</i>	<i>Loam argileux</i>
<b>Esturgeon</b>	2012-PG32 Z2	<i>Non couvert</i>		<i>Non couvert</i>	<i>Loam argileux</i>

<b>Esturgeon</b>	2012-PG8 Z1	4 et 3	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux; Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Argile limoneuse
<b>Esturgeon</b>	2012-PG8 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Argile limoneuse
<b>Esturgeon</b>	2013-MO1 Z1	5	Argile sableuse, Argile limoneuse, Argile	Argile lourde
<b>Esturgeon</b>	2013-MO1 Z2	5	Argile sableuse, Argile limoneuse, Argile	Argile lourde
<b>Esturgeon</b>	2013-MO2 Z1	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Argile
<b>Esturgeon</b>	2013-MO2 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Argile
<b>Esturgeon</b>	2013-MO3 Z1	3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Loam argileux
<b>Esturgeon</b>	2013-MO3 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Argile limoneuse
<b>Esturgeon</b>	2013-MO4 Z1	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Loam argileux
<b>Esturgeon</b>	2013-MO4 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Loam argileux
<b>Esturgeon</b>	2013-MO5 Z1	4 et 5	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux; Argile sableuse, Argile limoneuse, Argile	Argile lourde
<b>Esturgeon</b>	2013-MO5 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Argile lourde
<b>Lavallière</b>	2012-BV1 Z1	1	Sable grossier, Sable fin, sable très fin, sable grossier loameux, sable loameux, sable fin laomeux	Loam sableux
<b>Lavallière</b>	2012-BV1 Z2	1	Sable grossier, Sable fin, sable très fin, sable grossier loameux, sable loameux, sable fin laomeux	Loam sableux
<b>Lavallière</b>	2012-BV2 Z1	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Loam argileux
<b>Lavallière</b>	2012-BV2 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Loam argileux
<b>Lavallière</b>	2012-BV3 Z1	5	Argile sableuse, Argile limoneuse, Argile	Loam
<b>Lavallière</b>	2012-BV3 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Loam
<b>Lavallière</b>	2012-BV4 Z1	2	Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin	Loam argileux
<b>Lavallière</b>	2012-BV4 Z2	2	Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin	Loam sablo-argileux
<b>Lavallière</b>	2012-BV5 Z1	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Loam limoneux
<b>Lavallière</b>	2012-BV5 Z2	5 et 0	Argile sableuse, Argile limoneuse, Argile; Sols organiques	Loam

<b>Lavallière</b>	2013-BV1 Z1	0	Sols organiques	Sable fin
<b>Lavallière</b>	2013-BV1 Z2	2	Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin	Sable fin et loameux
<b>Lavallière</b>	2013-BV2 Z1	2 et 1	Sable très fin loameux, loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin; Sable grossier, Sable fin, sable très fin, sable grossier loameux, sable loameux, sable fin loameux	Sable loameux
<b>Lavallière</b>	2013-BV2 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Loam
<b>Lavallière</b>	2013-BV3 Z1	3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Loam sableux fin
<b>Lavallière</b>	2013-BV3 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Argile limoneuse
<b>Lavallière</b>	2013-BV4 Z1	5	Argile sableuse, Argile limoneuse, Argile	Loam
<b>Lavallière</b>	2013-BV4 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Loam
<b>Lavallière</b>	2013-BV5 Z1	3	Loam sableux très fin, Loam, Loam limoneux, Limon	Loam argileux
<b>Lavallière</b>	2013-BV5 Z2	4	Loam sablo-argileux, loam argileux, Loam limono-argileux	Loam argileux

En conclusion, rappelons que le principal objectif du volet géomatique du projet ciblait la validation à plus large échelle de la méthode de reconnaissance des propriétés du sol développée par Sylvain et al. (2011). Celle-ci s'appuie sur la mise en relation d'indices topographiques et d'indices spectraux dérivés d'images captées en conditions variables d'humidité des sols, avec les propriétés des sols colligées lors de campagnes de terrain. L'application dans le cadre du projet ReZoTaGe de la même approche dans trois autres régions d'étude, beaucoup plus étendues en superficie, a conduit à des résultats aussi satisfaisants que dans l'étude originale. Il est dès lors conclu que la méthode est transférable à l'ensemble du territoire agricole disposant de données géospatiales similaires.

La réalisation du projet ReZoTaGe a par ailleurs permis de faciliter l'application de la méthode en développant un ensemble de routines informatiques et statistiques permettant d'optimiser et d'automatiser la partie la plus complexe de la méthode, qui consiste à identifier les combinaisons d'indices qui offrent le meilleur pouvoir explicatif des propriétés du sol. La mise en forme conviviale de l'outil, en format de logiciel libre, contribuent aussi à la transférabilité de celui-ci auprès d'autres développeurs et utilisateurs de données géospatiales.

Dans la perspective de l'appui à la gestion localisée du parcellaire, les résultats obtenus dans les trois régions à l'étude, couvrant quelques centaines de kilomètres carrés, se sont avérés satisfaisants. Ils justifient l'utilisation de cette cartographie des propriétés des sols en appui au processus décisionnel de gestion localisée du parcellaire. Dans un cadre d'application à l'échelle de la ferme, la détection d'une forte probabilité de propriétés distinctes de sol à l'intérieur d'un même champ peut alors guider le producteur et son conseiller dans la délimitation de zones de gestion intra-parcellaire. Celles-ci devraient alors profiter d'un échantillonnage composite par zone permettant d'une part de valider le gradient dans les propriétés du sol et d'autre part de moduler au besoin la régie entre les zones contrastées en fonction des propriétés qui leur sont propres. Dans l'esprit des artisans du projet ReZoTaGe, la cartographie des propriétés du sol appuyée par la télédétection ne se substitue donc pas à l'exercice du jugement professionnel du conseiller agricole. Il est plutôt un outil permettant au conseiller d'appréhender la variabilité dans

les propriétés du sol, en amont d'autres démarches diagnostiques, telles que l'échantillonnage des sols ou la description de profils de sol.

Bien que les résultats du volet géomatique du projet soient prometteurs, plusieurs améliorations de l'outil peuvent encore contribuer au succès des prédictions de propriétés et à une plus grande couverture du territoire cartographié. D'une part, il n'y a pas de limites à l'inclusion de nouveaux indices spectraux ou topographiques dans l'application de la méthode. L'outil développé est robuste et adapté à des sources de données d'origines diverses. Dans le cadre de ce projet, les images Landsat ont été privilégiées en raison de leur gratuité. La multiplication des capteurs satellites à haute résolution au cours des deux dernières décennies offrent autant d'opportunités de mieux discriminer les propriétés des sols par la télédétection.

Le code informatique supportant les calculs de prédiction des propriétés des sols à partir des différents indices peut également être bonifié. L'automatisation des traitements initiaux des images satellitaires pourrait bénéficier d'un tel investissement. Un autre développement pourrait cibler l'adaptation de la méthode à la présence de couverture végétale, alors que l'approche actuelle s'est limitée aux sols nus en condition printanière. De plus larges territoires, où les cultures de fourrages pérennes sont plus répandues, pourraient alors bénéficier de l'application de la méthode. Le développement du code informatique de facture libre réalisé dans le cadre du présent projet, supportant l'automatisation des procédures itératives de calculs, pave définitivement la voie à la coopération dans le développement et l'optimisation des outils géospatiaux dans la gestion sur mesure du parcellaire agricole.

## 2.1.2. Volet agronomique

Le volet agronomique du projet ReZoTaGe s'inscrit à la suite du volet géomatique. Alors que ce dernier avait pour objectif d'appuyer la reconnaissance de la variabilité des propriétés des sols, le volet agronomique a pour objectif d'évaluer si la gestion de cette variabilité est pertinente, gérable et rentable. Dans un cadre décisionnel, cette évaluation comporte trois étapes. La gestion localisée se justifie d'abord par la validation des contrastes dans les propriétés du sol. La seconde étape consiste à évaluer si ces différences dans les propriétés du sol justifient une régie suivant des zones distinctes de gestion à l'échelle intra-parcellaire. Enfin, l'évaluation économique consiste à valider si l'augmentation du revenu ou la réduction des coûts de production justifie l'augmentation des coûts liés à la mise en œuvre de la gestion localisée de la parcelle.

Pour les besoins de la présente étude, et reflétant les préoccupations des trois équipes de services-conseils partenaires au projet, l'évaluation technico-économique de la gestion localisée s'est centrée sur le thème de la fertilisation azotée du maïs. La démarche retenue a soutenu l'évaluation et l'interprétation de la réponse à l'azote du maïs-grain dans un réseau d'essais à la ferme déployé dans trois bassins versants de la Montérégie. La présente section du rapport présente successivement les méthodes et résultats de cette démarche en lien avec l'évaluation des propriétés des sols, l'efficacité de l'azote et les teneurs en azote résiduels des sols. Une évaluation sommaire de la faisabilité économique de l'approche de gestion localisée inspirée des résultats agronomiques est également présentée.

### 2.1.2.1. Dispositif expérimental

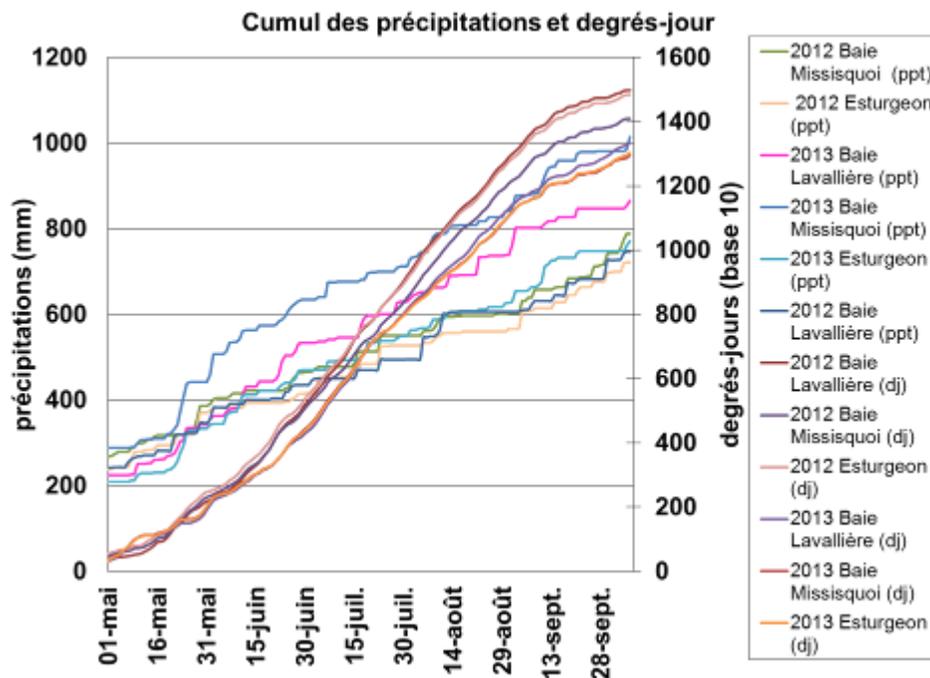
Les données recueillies dans le cadre du volet agronomique du projet REZOTAGE sont issues de 59 sites à l'étude en 2012 (29) et 2013 (30) suivant un protocole similaire à celui mis en œuvre par N'Dayegamiye (2009). Les essais ont été réalisés dans trois bassins versants distincts de la Montérégie, soit la rivière Esturgeon en Montérégie Ouest, la Baie Lavallière et la Baie Missisquoi en Montérégie-Est. Chaque région d'étude a profité d'une caractérisation récente de son flux d'azote dans le cadre de suivis hydrologiques réalisés par l'IRDA. Les champs retenus pour le volet agronomique du projet ont été proposés par les équipes de services-conseils à l'œuvre dans les trois régions à l'étude sur la base d'une appréhension d'une variabilité intra-parcellaire des propriétés du sol. La localisation des sites à l'étude au cours des deux saisons de production est présentée en annexe 2, alors que les tableaux 51 à 53 présentent les séries et propriétés texturales des sols à l'étude, de même que les précédents culturels et pratiques culturales. Dans l'ensemble, les champs présentent une grande variabilité, tant dans les propriétés des sols, l'aménagement des terres et les pratiques culturales. Tous les champs à l'étude étaient en culture de maïs-grain, suivant des précédents de maïs, soya et blé, respectivement, par ordre d'importance. Le travail réduit du sol au printemps ou à l'automne est la pratique culturale la plus utilisée, suivi du labour d'automne et du semi-direct. La majorité des champs profitent d'un drainage souterrain (18 sites), alors que onze champs ne sont pas drainés.

En ce qui a trait aux conditions agrométéorologiques, les deux années à l'étude se sont avérées fort contrastées au niveau des précipitations et des températures. Le tableau 50 présente les précipitations et degrés-jours cumulés dans les trois régions d'étude et les deux saisons de croissance. La segmentation des observations pour les périodes antérieures et postérieures au stade de post-levée met en relief des précipitations nettement plus élevées en 2013 qu'en 2012 pour les deux périodes de croissance. La figure 30 illustre le cumul journalier ces précipitations et des degrés-jours en cours de saison pour l'ensemble des sites et années. La saison 2012 était optimale au plan des conditions agrométéorologiques, favorables à la minéralisation de l'azote, à

la préparation de bons lits de semences et à la croissance du maïs. Les conditions printanières étaient beaucoup moins favorables en 2013, avec des cumuls de précipitations très élevés entre les semis et la post-levée des cultures, atteignant jusqu'à 274 mm de pluie dans région de Missisquoi. Les observations pertinentes à l'azote du sol et au rendement des cultures colligées en cours de projet indiquent que les conditions météorologiques contrastées entre les deux saisons de production ont manifestement affecté la dynamique de l'azote et la croissance des cultures.

**Tableau 50. Précipitations et cumul des degrés jours au cours des saisons de croissance 2012 et 2013 pour les trois régions à l'étude.**

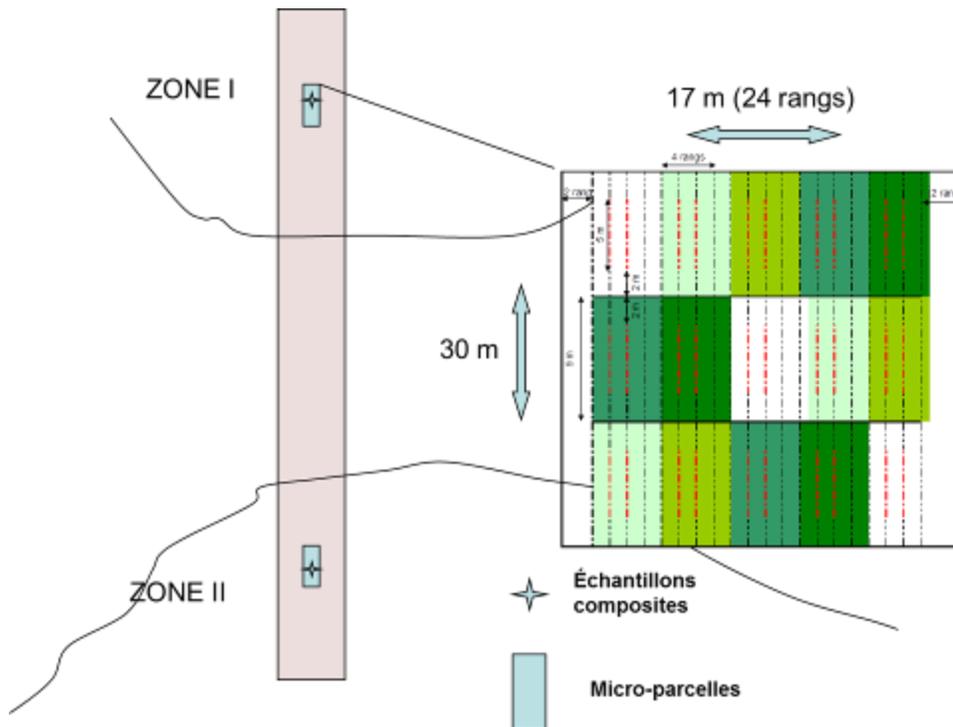
Année	Région	Station météo	Période du semis à la post-levée		Période de post-levée à la récolte		Total Saison de croissance	
			Précipitation cumulée (mm)	Degrés-jours cumulés	Précipitation cumulée (mm)	Degrés-jours cumulés	Précipitation cumulée (mm)	Degrés-jours cumulés
2012	Baie Lavallière	Sorel	158	292	347	1168	505	1460
2012	Baie Missisquoi	Farnham	153	288	367	1074	519	1362
2012	Esturgeon	Sainte-Martine	156	302	328	1126	484	1428
2013	Baie Lavallière	Sorel	207	272	435	1033	642	1305
2013	Baie Missisquoi	Farnham	274	273	453	991	728	1264
2013	Esturgeon	Sainte-Martine	203	272	359	1001	562	1273



**Figure 30. Précipitations et cumul des degrés jours au cours des saisons de croissance 2012 et 2013 pour les trois régions à l'étude.**

Le dispositif expérimental mis en œuvre a permis d'évaluer la variabilité intra-parcellaire dans les propriétés des sols et les courbes de réponse à l'azote suivant un dispositif expérimental de deux zones par champ, localisées avec le support des indices cartographiques générés dans le volet télédétection du projet. La figure 31 illustre le dispositif expérimental à l'échelle du champ comportant deux zones distinctes de gestion, chacune comportant 5 traitements d'apports azotés en post-levée (0, 50, 100, 150, 200 N) et répétés en trois blocs. Le dispositif en bloc aléatoire assure que les traitements étaient disposés de façon à ce que les parcelles ayant le même taux de fertilisation ne soit pas consécutives sur les rangs. Chaque parcelle comportait 4 rangs de

maïs et mesurait 9 mètres. L'espacement entre les rangs était de 76 cm. Les dates de semis, le choix des hybrides de maïs et les techniques culturales appropriées étaient variables d'un producteur à l'autre. Une dose de 50 N kg/ha d'azote minéral a été appliquée uniformément au semis dans l'ensemble des champs par les producteurs. Les traitements d'azote en post-levée ont été appliqués manuellement entre le stade V4 et V6 du maïs en bande à environ 20 cm du rang. Toutes les applications d'engrais azotés ont été faites sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0).



**Figure 31. Dispositif expérimental intra-parcellaire mis en œuvre dans le cadre du projet REZOTAGE.**

Échantillonnage et analyse des végétaux. La récolte des sites d'essai a été réalisée au début octobre avant la récolte du maïs par les producteurs. Dans les 59 sites, deux rangs de 5 mètres de longueur ont été récoltés manuellement pour la détermination des rendements en grains et tiges. Les épis étaient recueillis manuellement puis égrenés à l'aide d'une batteuse. Les échantillons ont été pesés avant qu'un sous-échantillon représentatif des grains ne soit prélevé et placé dans un séchoir pour déterminer sa teneur en eau. Ceux-ci ont ensuite servi pour effectuer l'analyse de la teneur en N total des grains. En 2012, tous les échantillons ont été envoyés au laboratoire pour le dosage du N alors qu'en 2013 seulement ceux issus des parcelles témoins (0 N kg/ha) ont profité d'un dosage. Les tiges ont été récoltées uniquement dans les parcelles témoins (0 N kg/ha) puis traitées suivant un protocole similaire aux grains. Le cumul des biomasses et de l'azote du grain et des tiges est dès lors utilisé comme indicateur de la fourniture du sol en azote.

Échantillonnage et analyse des sols. L'échantillonnage et le dosage des propriétés des sols s'est fait en deux étapes. Une première série d'échantillonnage a été réalisée lors de l'application de l'azote en post-levée. Dans la totalité des sites, deux échantillons composites de chacune des deux zones ont été recueillis. Un premier échantillon a été prélevé sur une profondeur de 20 cm afin de déterminer le pH du sol, la texture, et la richesse du sol pour les éléments P, K, Mg, Ca et Al, par la méthode d'extraction Mehlich 3. Le deuxième échantillon a été prélevé sur une profondeur de 0-30 cm afin de déterminer la teneur en azote ( $\text{NH}_4$  et  $\text{NO}_3$ ). Des échantillons ont

aussi été prélevés suivant le même protocole dans toutes les parcelles témoins de chacune des zones. La deuxième série d'échantillonnage a été réalisée lors de la récolte. Dans chaque parcelle témoin, deux cylindres de sol ont été prélevés respectivement dans la couche arable (0-20 cm) et dans l'horizon diagnostique « B » (20-40 cm). Les cylindres de sol non dérangés ont été ramenés au laboratoire de l'IRDA pour leur détermination de la masse volumique apparente, de la macroporosité mesurée à 100 cm de tension, puis de leur conductivité hydraulique saturée. Deux échantillons à une profondeur respective de 0-30 et 30-60 cm ont également été prélevés au moment de la récolte dans les parcelles témoins et les parcelles traitées au taux de 150 N kg/ha afin de déterminer la teneur du sol en azote résiduel (NH<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub>).

Détermination de la dose économique optimum de N. Le modèle quadratique-plateau a systématiquement été utilisé pour établir les relations entre les rendements de maïs et les doses d'azote appliquées dans l'ensemble des zones de champs à l'étude, compte tenu que des évaluations antérieures au Québec ont démontré que ce modèle offrait la meilleure précision, tout en minimisant les résidus (Giroux et al., 2008; 2009). Au plan méthodologique, le choix d'un modèle unique était également motivé par l'intérêt de comparer les doses optimales obtenues selon une méthode commune et de les mettre en relation avec les propriétés des sites. Conceptuellement, la dose économique concilie la productivité optimale avec la rentabilité économique de l'azote. Aussi, le calcul de la dose économique est sensible au coût de l'engrais azoté ainsi qu'au prix du maïs grain. Pour les besoins de la présente étude un ratio coût N (\$/T-N) / Prix maïs (\$/T) de cinq a été retenu.

Détermination de coefficient d'utilisation de l'azote des engrais. Le coefficient d'utilisation des engrais N (CUN) est un indicateur de la proportion de la dose de N appliquée qui a été utilisée par la partie aérienne du maïs. Dans le calcul du CUN, les prélèvements en N (grains+tiges) dans les parcelles témoins sont associés à la fourniture d'azote par le sol. Ainsi, le CUN est égal à la différence des prélèvements N entre les parcelles fertilisées en N et la parcelle témoin sans N, divisé par la dose de N appliquée (Giroux et al., 2000). Les prélèvements d'azote dans les grains pour les parcelles fertilisées ont été déterminés à partir du rendement de la parcelle et des taux moyens de N du grain rapportés par N'dayegamiye et al. (2009) selon l'équation suivante :

$$\text{Prélèvement en N} - \text{NO}_3 \left( \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) = 1.3049^{-02} \times \text{rend. en maïs en} \left( \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) \times 1.0246$$

### 2.1.2.2. Propriétés physico-chimiques des sols

La présente section dresse un portrait des propriétés de sols à l'étude en mettant en relief les corrélations observées entre les indicateurs de fertilité, de dynamique de l'azote et de la structure des sols. Les tableaux 51 à 53 décrivent les sites à l'étude tandis que le tableau 54 présente les distributions des propriétés physico-chimiques des sols par région d'étude pour l'ensemble des 59 sites expérimentaux. Les distributions mettent en relief un gradient régional dans les propriétés des sols, reflétant les matériaux parentaux dominants dans les trois bassins versants. Ainsi, le bassin versant de l'Esturgeon se démarque par une dominance de sites présentant des textures argileuses de même que par la présence de zones organiques. Les textures franches dominent le bassin Missisquoi, alors que les textures légères dominent les sites de la Baie Lavallière. Le gradient textural se reflète dans les autres propriétés physico-chimiques des sols des sites à l'étude. La matrice de corrélation des propriétés présentée au tableau 55 exprime bien ces liens. Les corrélations positives entre le taux d'argile et les richesses du sol en matière organique, en potassium et en calcium azote total traduisent la fertilité naturelle associée aux sols argileux. Certaines zones argileuses présentent cependant des indices de saturation en phosphore (ISP) très basses (< 2%), à l'origine d'une corrélation négative avec le taux d'argile. Cette corrélation est attribuée à des facteurs de régie des sols plutôt qu'aux propriétés stables des sols.

**Tableau 51. Description des sites expérimentaux du bassin versant Lavallière.**

<b>Bassin de la Baie Lavallière</b>						
<b>Année/ No. de site</b>	<b>Série de sol</b>	<b>Texture</b>	<b>Précédent cultural</b>	<b>Pratique culturale</b>	<b>Drainage</b>	<b>Élévation (m)</b>
2012-BV1 Z1	Massueville sable fin loameux	loam sableux	Soya	Travail réduit Vibro	Drainé Terrain nivelé	21,25
2012-BV1 Z2	Massueville sable fin loameux	loam sableux				21,73
2012-BV2 Z1	St-Aimé variante non calcaire loam	loam argileux	Maïs	Travail réduit chisel	Drainé Terrain nivelé	17,55
2012-BV2 Z2	St-Ours loam limono-argileux	loam argileux				18,21
2012-BV3 Z1	Ste-Rose loam	loam	Blé	Travail réduit chisel	Fossé Planche arrondie	15,55
2012-BV3 Z2	Bellevue loam	loam				15,82
2012-BV4 Z1	Aston variante calcaire sable fin loameux	loam argileux	Soya	Travail réduit Vibro	Drainé Terrain nivelé	20,80
2012-BV4 Z2	Aston variante calcaire sable fin loameux	loam sablo-argileux				20,89
2012-BV5 Z1	Alluvions récentes non différenciées	loam limoneux	Maïs	Conventionnel Charrue	Fossé Planche arrondie	6,84
2012-BV5 Z2	Alluvions récentes non différenciées	loam				6,30
2013-BV1 Z1	St-Thomas sable fin	sable fin	Soya	Travail réduit Vibro	Drainé Terrain nivelé	21,57
2013-BV1 Z2	St-Thomas sable fin	sable fin et loameux				18,74
2013-BV2 Z1	St-Jude sable loameux	sable loameux	Maïs	Travail réduit Vibro	Drainé Terrain nivelé	22,69
2013-BV2 Z2	Bellevue loam humifère	loam				21,74
2013-BV3 Z1	Pierreville loam sableux	loam sableux fin	Maïs	Conventionnel Charrue	Fossé Planche arrondie	8,72
2013-BV3 Z2	Alluvions récentes non différenciées	argile limoneuse				6,63
2013-BV4 Z1	Ste-Rose loam	loam	Maïs	Conventionnel Charrue	Fossé Planche arrondie	15,53
2013-BV4 Z2	Bellevue loam	loam				15,77
2013-BV5 Z1	Joseph loam sableux fin	loam argileux	Maïs	Conventionnel Charrue	Fossé Planche arrondie	14,61
2013-BV5 Z2	Bellevue loam	loam argileux				14,75

**Tableau 52. Description des sites du bassin versant de la Baie Missisquoi.**

<b>Bassin de la Baie Missisquoi</b>						
Année/ No. de site	Série de sol	Texture	Précédent culturel	Pratique culturale	Drainage	Élévation (m)
2012-DC1 Z1	Laprairie	loam	Blé	Conventionnel Charrue	Drainé Terrain nivelé	38,00
2012-DC1 Z2	Boucherville substratum non calcaire	loam				37,00
2012-DC2 Z1	Bearbrook	loam sablo-argileux	Maïs	Conventionnel Charrue	Drainée Planche arrondie	46,82
2012-DC2 Z2	Saint-Valentin substratum non calcaire	loam argileux				47,16
2012-DC3 Z1	Lacolle substratum non-calcaire	loam sablo-argileux	Maïs	Conventionnel Charrue	Drainée Planche arrondie	39,06
2012-DC3 Z2	Saint-Valentin substratum non calcaire	loam sableux fin				39,60
2012-DC4 Z1	Saint-François	loam sableux fin	Soya	Semi direct	Drainée Planche arrondie	73,18
2012-DC4 Z2	Lévrard	argile				72,82
2013-DC1 Z1	Saint-Benoit	loam sableux	Maïs	Conventionnel Charrue	Drainé Terrain nivelé	52,15
2013-DC1 Z2	Boucherville	loam sableux fin				51,76
2013-DC2 Z1	Boucherville	loam	Maïs	Conventionnel Charrue	Drainé Terrain nivelé	50,35
2013-DC2 Z2	Saint-Brigide	loam				51,38
2013-DC3 Z1	Boucherville	loam sableux	Maïs	Conventionnel Charrue	Drainé Terrain nivelé	51,71
2013-DC3 Z2	Ange-Gardien	loam				52,80
2013-DC4 Z1	Chambly	argile	Maïs	Semi direct	Drainé Terrain nivelé	47,88
2013-DC4 Z2	Chambly	argile				47,60
2013-DC5 Z1	Chambly	loam argileux	Maïs	Semi direct	Drainé Terrain nivelé	48,01
2013-DC5 Z2	Chambly	argile				46,87

**Tableau 53. Description des sites du bassin versant de l'Esturgeon.**

<b>Bassin de l'Esturgeon</b>						
Année/ No. de site	Série de sol	Texture	Précédent culturel	Pratique culturale	Drainage	Élévation (m)
2012-MT23 Z1	Terre noire sur argile	argile limoneuse	Blé	sous-solage	Non drainé Terrain nivelé	43,99
2012-MT23 Z2	Terre noire sur argile	argile limoneuse				44,10
2012-MT24 Z1	Loam argileux ravinés (matériaux d'Ormstown)	argile lourde	Blé	sous-solage	Non drainé Terrain nivelé	42,62
2012-MT24 Z2	Saint-Urbain argile	argile lourde				42,67
2012-PG31 Z1	Norton loam sableux graveleux caillouteux	argile	Soya	Travail réduit d'automne	Non drainé Terrain nivelé	49,42
2012-PG31 Z2	Sainte-Rosalie argile sableuse à loam argileux	argile lourde				48,40
2012-PG32 Z1	Sainte-Rosalie argile sableuse à loam argileux	loam argileux	Soya	Travail réduit d'automne	Non drainé Terrain nivelé	50,90
2012-PG32 Z2	Saint-Bernard loam graveleux caillouteux phase rocheuse	loam argileux				51,97
2012-PG8 Z1	Terre noire sur argile	argile limoneuse	Soya	Travail réduit d'automne	Non drainé Terrain nivelé	43,46
2012-PG8 Z2	Terre noire sur argile	argile limoneuse				43,51
2013-MO1 Z1	Sainte-Rosalie argile	argile lourde	Maïs	Conventionnel Charrue	Drainé Terrain nivelé	40,39
2013-MO1 Z2	Sainte-Rosalie argile	argile lourde				40,53
2013-MO2 Z1	Providence variante substratum réduit argile limoneuse	argile	Maïs	Travail réduit chisel	Drainé Terrain nivelé	41,31
2013-MO2 Z2	Providence variante substratum réduit argile limoneuse	argile				42,63
2013-MO3 Z1	Saint-Mathieu loam	loam argileux	Soya	Travail réduit d'automne	Non drainé Terrain nivelé	50,05
2013-MO3 Z2	Saint-Blaise loam argileux légèrement à modérément pierreux	argile limoneuse				49,04
2013-MO4 Z1	Saint-Blaise loam limono-argileux	loam argileux	Maïs	Conventionnel Charrue	Drainé (plus ou moins fonctionnel) Terrain nivelé	51,12
2013-MO4 Z2	Saint-Blaise loam limono-argileux	loam argileux				52,24
2013-MO5 Z1	Rideau argile	argile lourde	Soya	Travail réduit	Drainé (plus ou moins fonctionnel) Terrain nivelé	40,32
2013-MO5 Z2	Sainte-Rosalie argile	argile lourde				40,52

Au plan des indicateurs de la structure des sols, les déterminations en laboratoire de la masse volumique apparente (MVA), de la macroporosité à 100 cm de succion (MP-100) et de la conductivité hydraulique saturée (Ks) pour les cylindres de sol prélevés dans les couches arables (0-20 cm) des zones à l'étude sont corrélées entre elles. Cette cohérence témoigne de la contribution de la macroporosité à diminuer la densité apparente du sol ( $r=-0.55^{**}$ ) et à faciliter la circulation de l'eau, tel qu'en témoigne la corrélation positive avec la conductivité hydraulique ( $r=0.61^{***}$ ). Dans l'ensemble, les zones sablonneuses présentent des MVA plus élevées, reflétant le lien généralement établi entre textures légères et densités du sol relativement plus élevées ( $r=0.54^{**}$ ). Les densités apparentes des couches arables des sites à l'étude sont aussi fortement et inversement corrélées avec le taux de matière organique dans le sol (MOS) ( $r=0.88^{***}$ ). Les MVA relativement moins élevées des zones argileuses sont ainsi redevables en partie à leur teneur plus élevée en matière organique, reflétant la corrélation significative entre MOS et la teneur en argile ( $r=0.57^{***}$ ).

Les MVA généralement plus faibles observées en sol argileux, bien que tributaires de taux de MOS relativement élevés, ne sont cependant pas redevables à des macroporosités plus élevées. En effet, la macroporosité tend plutôt à diminuer dans les sols où la teneur en argile est élevée ( $r=-0.49^*$ ), mais tend à augmenter dans les sols présentant un taux de MOS relativement plus élevé ( $r=0.42^*$ ). Il en va de la même façon pour la conductivité hydraulique de la couche arable, aussi corrélée avec le taux de MOS ( $r=0.51^{**}$ ). En théorie, une macroporosité qui tend à décroître avec la teneur en argile est contraire au gradient généralement exprimé dans la littérature, qui associe l'argile au développement de macropores dans le sol. Si les observations sur les propriétés des sols à l'étude tendent à confirmer le rôle de la MOS dans le maintien d'une condition physique favorable du sol, elles pointent aussi vers une vulnérabilité relativement plus élevée des sols argileux aux processus d'altération de leur structure par les opérations culturales.

En ce qui a trait aux propriétés du sol des horizons « B », contrairement aux observations portant sur la couche arable, il est observé que la MVA n'est plus significativement et inversement corrélée avec la macroporosité. Cette absence de corrélation est attribuée aux taux de MOS relativement bas sous la couche arable, lesquels ne peuvent y jouer le rôle structurant qui leur est attribué dans la couche arable. La corrélation inverse et significative entre la MVA et la conductivité hydraulique saturée sous la couche arable ( $r=0.67^{***}$ ) est par ailleurs interprétée comme un indicateur de phénomènes de compaction du sol. La distribution des observations de conductivité hydraulique du sous-sol illustre que les faibles valeurs de Ks ( $< 0,01$  cm/min) sont observées dans toute la gamme des textures de sol (entre 9 et 58 % d'argile). Une implication pratique déduite de ces observations de la saison 2012 est que les problèmes de ressuyage du sol sont susceptibles de se manifester dans tous les types de sol. Rappelons qu'à l'heure de la préparation du présent rapport, les dosages des propriétés physiques des cylindres prélevés en cours de saison 2013 (30 sites X 12 cylindres/site) ne sont pas encore complétés. L'interprétation globale des résultats colligés au cours des deux saisons d'étude permettra à terme de préciser les relations entre les propriétés physiques de tous les sites à l'étude.

**Tableau 54. Estimations moyennes et écarts-type des propriétés physico-chimiques des sols par région d'étude.**

Propriété physico-chimique	Lavallière				Missisquoi				Esturgeon			
	Moy	Min	Max	Écart-type	Moy	Min	Max	Écart-type	Moy	Min	Max	Écart-type
Sable (%)	54	5	91	27	46	20	70	15	13	1	38	12
Limon (%)	27	3	51	18	28	12	39	8	35	23	51	7
Argile (%)	20	6	44	11	27	13	49	11	52	29	68	13
pH eau	7	6	7	0	7	6	7	0	7	6	7	0
Matière organique (%)	5	3	9	2	4	2	11	2	8	4	31	7
Ntot	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
C:N	14	12	17	2	13	10	15	1	12	10	15	1
NH4 en Pré-levée (mg/kg N-NH4)	1,8	0,6	3,5	0,6	2,5	1,2	4,9	1,0	3,2	1,6	7,3	1,3
NO3 en Pré-levée (mg/kg N-NO3)	10,7	4,0	32,2	7,1	14,1	4,4	32,5	7,8	15,7	4,5	39,8	9,7
Mehlich P (mg/kg)	77,1	14,2	124,0	36,6	13,2	6,7	101,0	30,7	38,6	19,7	90,0	18,2
Indice de saturation en P (%)	7,5	1,3	13,0	4,3	5,3	0,8	14,7	3,7	5,0	2,0	13,6	3,0
Mehlich K (mg/kg)	103	43	169	47	108	44	176	34	159	81	222	40
Mehlich Ca (mg/kg)	1683	357	3625	897	2103	882	4625	986	3761	2231	8357	1726
Mehlich Mg (mg/kg)	149	18	647	162	165	31	349	95	582	201	938	221
Mehlich Al (mg/kg)	1128	716	1683	353	900	542	1322	229	977	588	1145	141
Masse volumique apparente 0-20cm (g/cc)	1,37	0,98	1,61	0,19	1,44	1,12	1,61	0,17	1,16	0,73	1,54	0,29
Macroporosité (0-20 cm)	0,19	0,13	0,24	0,03	0,16	0,11	0,22	0,04	0,17	0,10	0,26	0,06
Conductivité hydraulique 0-20 cm (cm/min)	0,09	0,00	0,43	0,13	0,03	0,00	0,09	0,03	0,10	0,00	0,51	0,15
Conductivité hydraulique 20-40 cm (cm/min)	0,05	0,00	0,20	0,07	0,02	0,00	0,09	0,03	0,07	0,01	0,22	0,06
Masse volumique apparente 0-40cm (g/cc)	1,46	1,05	1,66	0,19	1,48	1,15	1,67	0,19	1,28	1,07	1,51	0,14
Macroporosité (20 - 40 cm)	0,17	0,12	0,25	0,05	0,15	0,11	0,23	0,04	0,16	0,11	0,21	0,03
Indice de brillance <sup>1</sup>	2,96	-0,33	9,26	2,77	5,15	-0,92	12,89	4,07	1,47	-0,54	4,63	1,50

<sup>1</sup> Déterminations de 2013 non disponibles en date du présent rapport

<sup>2</sup> Indice de brillance normalisé (IBN) \* (-1,000), spectre de réflectance du 21 mai 2009, Lansat V.

**Tableau 55. Corrélations linéaires paramétriques de Pearson entre les propriétés des sols des sites expérimentaux.**

	NO3- PL	Sable	Argile	pH	MOS	Ntot	C/N	ISP	Meh- K	Meh- Ca	Meh- Al	MVA- 20	Macro- 20	Cond- 20	MVA- 40	Macro- 40
Sable	ns															
Argile	ns	<b>-0.90***</b>														
pH	ns	ns	ns													
MOS	<b>0.62***</b>	<b>-0.51***</b>	<b>0.57***</b>	ns												
Ntot	<b>0.63***</b>	<b>-0.61***</b>	<b>0.62***</b>	ns	<b>0.99***</b>											
C/N	ns	<b>0.64***</b>	<b>-0.60***</b>	ns	ns	<b>ns</b>										
ISP	ns	<b>0.35**</b>	<b>-0.44***</b>	ns	ns	ns	<b>0.58***</b>									
Meh-K	ns	<b>-0.63***</b>	<b>0.60***</b>	ns	<b>0.41**</b>	<b>0.45***</b>	<b>-0.29*</b>	ns								
Meh-Ca	<b>0.47***</b>	<b>-0.86***</b>	<b>0.91***</b>	ns	<b>0.84***</b>	<b>0.86***</b>	ns	ns	<b>0.61***</b>							
Meh-Al	ns	ns	ns	<b>-0.29*</b>	ns	<b>-0.27*</b>	ns	<b>-0.38**</b>	<b>-0.26*</b>	<b>-0.35**</b>						
MVA-20	<b>-0.74***</b>	<b>0.54**</b>	<b>-0.49*</b>	ns	<b>-0.88***</b>	<b>-0.91***</b>	ns	ns	<b>-0.49**</b>	<b>-0.85***</b>	ns					
Macro-20	<b>0.38*</b>	ns	<b>-0.49*</b>	ns	<b>0.42*</b>	<b>0.44*</b>	<b>0.37*</b>	<b>0.57*</b>	ns	ns	ns	<b>-0.55**</b>				
Cond-20	ns	ns	ns	ns	<b>0.51**</b>	<b>0.50**</b>	ns	ns	ns	ns	ns	<b>-0.49**</b>	<b>0.61***</b>			
MVA-40	<b>-0.50**</b>	<b>0.50*</b>	<b>-0.52**</b>	<b>-0.51*</b>	<b>-0.69***</b>	<b>-0.71***</b>	ns	ns	ns	<b>-0.63**</b>	ns	<b>0.81***</b>	ns	ns		
Macro-40	ns	<b>0.49*</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
Cond-40	ns	ns	ns	ns	<b>0.57**</b>	<b>0.55**</b>	ns	ns	ns	<b>0.45*</b>	ns	<b>-0.59**</b>	<b>0.40*</b>	<b>0.51**</b>	<b>-0.67***</b>	ns

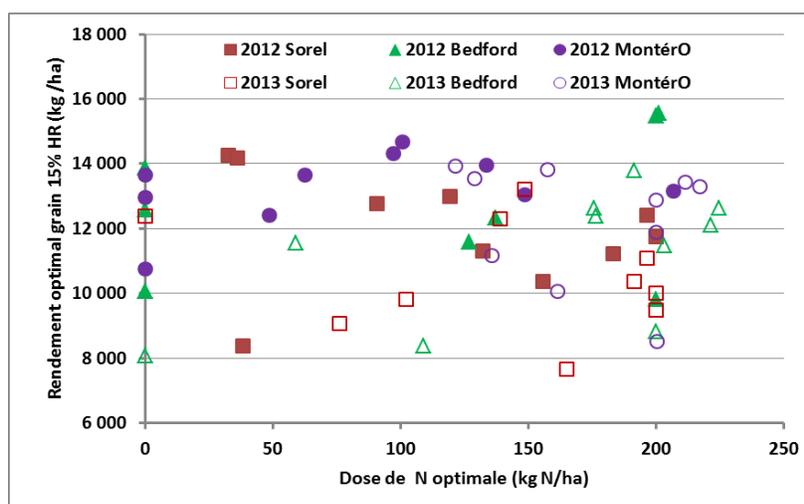
**\***, **\*\***, **\*\*\***: Respectivement significatifs au seuils de 0.05, 0.01 et 0.001.

En ce qui a trait à l'azote du sol, la corrélation entre le taux de MOS, l'azote total et la teneur en argile du sol indique que le stock de N présent dans le sol tend à augmenter en sol plus lourd ( $r=0.62^{***}$ ). Aussi, il est attendu que le taux de MOS et de N total soit corrélé positivement au taux de nitrates dans la couche arable en période de post-levée ( $r=0.62^{***}$ ). Cette corrélation

témoigne de la relation entre la disponibilité d'un stock relativement plus important d'azote organique et la disponibilité accrue de nitrates en cours de saison de croissance, redevable aux processus naturels de minéralisation de l'azote organique du sol. Par contre, le taux de  $\text{NO}_3$  observé en post-levée n'est pas corrélé significativement avec les indicateurs de texture du sol, pourtant significativement corrélé avec le stock de N total. Le taux de nitrates observé en post-levée est cependant corrélé avec la macroporosité mesurée dans les couches arables des sols à l'étude. Le fait que la macroporosité soit un meilleur indicateur du taux de nitrates observé en post-levée que la texture témoigne vraisemblablement de l'influence de la condition physique du sol sur le processus de minéralisation du stock d'azote organique présent dans le sol. Une implication pratique de ces observations est la synergie entre le maintien d'un taux de MOS relativement élevé et d'une condition physique du sol favorable pour assurer la disponibilité de l'azote à la culture, au bon moment (post-levée).

### 2.1.2.3. Rendements et courbes de réponse à l'azote

Cette section-ci présente les résultats des courbes de réponse à l'azote colligées à partir des 870 parcelles récoltées manuellement pour l'ensemble des 58 sites d'études. Rappelons que les conditions météorologiques de la saison 2012 étaient particulièrement favorables à l'obtention de rendements optimaux, alors que la saison 2013 témoigne de conditions nettement moins favorables en raison des excès de précipitation. Le premier constat qui se dégage de l'ensemble des courbes de réponse à l'azote est l'absence de lien entre les rendements optimaux observés et les doses optimales d'apport de N estimées pour chacune des 58 zones de sol à l'étude, tel qu'illustré à la figure 32. Cette absence de lien significatif traduit d'une part la forte variabilité des réponses de la croissance du maïs au taux de N appliqué et d'autre part la forte variabilité des taux d'azote disponible dans le sol observés au stade de la post-levée. Une première implication opérationnelle déduite de cette importante variabilité est la difficile généralisation des recommandations d'apport de N, et de l'intérêt de considérer la spécificité d'un site donné dans la prise de décision en matière de fertilisation azotée.



**Figure 32. Variabilité interannuelle et régionale des rendements optimaux et des doses optimales d'azote.**

À titre indicatif de l'effet de l'année et de la région d'étude, le tableau 56 présente les moyennes des rendements optimaux de culture de maïs et des doses optimales de N associées pour les trois régions et les deux années de culture. Bien qu'une grande réserve doive s'appliquer à l'appréciation de ces moyennes de rendements compte tenu de l'extrême variation des résultats, la comparaison des moyennes par région et par année témoigne néanmoins de rendements

inférieurs en 2013, de même que de doses optimales de N supérieures. Ce gradient annuel apparent traduit l'effet des conditions agroclimatiques contrastées entre les deux années de culture sur le développement des cultures et la disponibilité de l'azote. Il semble par ailleurs y avoir une interaction entre l'année (climat) et la région. En effet, la dose optimale d'azote double dans le bassin de l'Esturgeon, alors que les augmentations de doses optimales sont beaucoup moins considérables dans les deux autres régions à l'étude. Une hypothèse plausible tiendrait à la dominance des sols argileux dans le bassin de l'Esturgeon. Les sols argileux seraient relativement plus sensibles aux effets de l'humidité excessive du sol sur la minéralisation de l'azote organique du sol et sur les pertes d'azote par dénitrification, de même que sur les propriétés physiques du sol favorables au développement de la culture. Rappelons cependant que les essais ont été réalisés sur des sites différents en 2012 et 2013 et limitent l'interprétation de l'effet annuel sur les résultats obtenus. L'interprétation approfondie des relations rendements-doses N optimales commandent ainsi l'analyse des réponses à l'azote propre à chaque site.

En parallèle à l'augmentation des doses optimales de N estimées en 2013, la variabilité des réponses à l'azote déterminées pour chacun des sites est plus importante en 2013. La figure 33 illustre cette variabilité dans l'ajustement des modèles de prédiction de la dose optimale d'azote pour l'ensemble des sites à l'étude. Les indicateurs d'ajustement des modèles sont également rapportés aux tableaux 57 et 58, en complément des rendements économiques et des doses optimales de N dérivées des modèles statistiques de type quadratique-plateau. Dans l'ensemble, l'ajustement des modèles de réponse à l'azote est très variable d'une zone à l'autre.

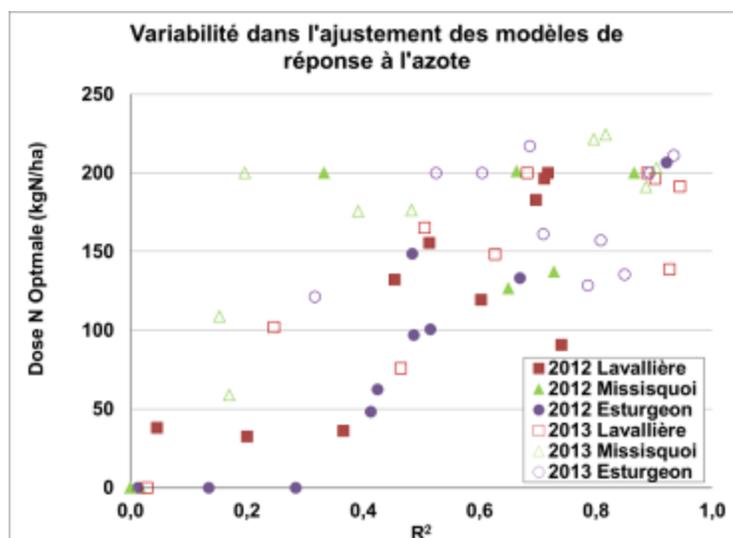


Figure 33. Variabilité dans l'ajustement des modèles de prédiction de la dose optimale d'azote.

Tableau 56. Moyennes et coefficients de variation du rendement et de la dose optimale par saison de croissance et région d'étude.

Année	Région	Noptimal	Rendement optimal	CV (%)
2012	Lavallière	118	11 963	10
	Missisquoi	108	12 660	9
	Esturgeon	80	13 262	8
2013	Lavallière	136	10 559	16
	Missisquoi	156	11 189	19
	Esturgeon	173	12 253	17

Pour chacune des deux années de culture, la réponse du rendement à la dose d'azote appliquée n'est pas significative sur plus du tiers des zones à l'étude (26/59). Deux situations peuvent contribuer à expliquer l'absence de corrélation observée entre l'apport de N et le rendement. D'une part, une fourniture élevée du sol en azote, qui comble les besoins du maïs, se traduit en dose optimale d'apport en post-levée pratiquement nulle. Les rendements des parcelles témoins, sans apport de N en post-levée, se différencient alors très peu des rendements sur les parcelles sur-fertilisées. Neuf zones d'études, principalement en 2012, témoignent de telles situations de non réponse à l'azote. Les reliquats de fertilisations automnales aux engrais de ferme (2012 BV3, 2012 MT23) et la minéralisation d'azote dans les couches arables de sols présentant des taux élevés de MOS (2012 PG32, 2012 DC4) expliquent ces fortes contributions de l'azote du sol.

Plusieurs autres facteurs, autre que la dynamique de l'azote du sol, ont contribué à l'absence de corrélation significative entre rendement et dose d'azote dans onze zones à l'étude. Dans ces zones, ces facteurs ont contribué à une forte variabilité spatiale du rendement, qui surpasse l'effet de la dose de N appliqué. La courbe de réponse à l'azote est alors non significative. Les facteurs en cause incluent des problématiques d'inondation (2012 BV5), la prédation des oies (2013 BV3) et l'infestation de chrysomèle (2013 BV4) dans le bassin Lavallière. De mauvaises conditions d'égouttement et une condition physique du sol défavorable (2012 DC1, 2013 DC2, 2013 DC5) de même qu'une population inégale liée à de mauvaises conditions de semis (2013 DC4) sont liées à une réponse non significative du rendement à la dose d'azote dans le bassin Missisquoi. Dans le bassin de l'Esturgeon, les zones du site 2013 MO4 se distinguent par une forte variabilité spatiale intra-zone en lien avec un drainage souterrain déficient. Pour la majorité des 33 autres sites à l'étude où la réponse du rendement à la dose de N est significative ( $prob < 0,05$ ), les doses optimales se situent généralement entre généralement de 125 à 200 kg N/ha. Les figures 34 à 39 illustrent les courbes de réponses pour chacune des 58 zones à l'étude dans les trois régions.

Tableau 57. Rendements et prélèvements N de la parcelle témoin (0 N en post-levée), rendement économique, dose optimale d'azote et valeurs F associées aux modèles de régression de rendement sur la dose de N appliquée en post-levée pour la saison de croissance 2012.

Site	Rendement du témoin (kg/ha)	Rendement économique (kg/ha) <sup>1</sup>	Prélèvement N du témoin	Dose N optimale (kg/ha) <sup>1</sup>	Valeur F 1	Prob >F 1
2012-BV1 Z1	7 168	11 211	87	183	7,59	0,00
2012-BV1 Z2	7 714	8 371	100	38	1,53	0,27
2012-BV2 Z1	6 818	11 742	74	200	7,64	0,00
2012-BV2 Z2	7 477	10 367	98	156	3,30	0,06
2012-BV3 Z1	13 704	14 276	226	32	0,93	0,48
2012-BV3 Z2	13 504	14 190	205	36	1,64	0,24
2012-BV4 Z1	9 472	12 761	112	91	8,88	0,00
2012-BV4 Z2	9 967	12 982	131	119	3,98	0,03
2012-BV5 Z1	8 581	11 317	140	132	3,24	0,06
2012-BV5 Z2	8 004	12 416	118	196	6,88	0,01
2012-DC1 Z1	9 241	12 321	115	137	7,27	0,01
2012-DC1 Z2	9 962	10 059	158	0	1,30	0,34
2012-DC2 Z1	9 838	15 561	131	201	5,33	0,01
2012-DC2 Z2	8 699	15 481	93	200	21,39	0,00
2012-DC3 Z1	6 979	9 813	98	200	4,58	0,02
2012-DC3 Z2	8 859	11 589	120	127	5,58	0,02
2012-DC4 Z1	13 926	13 868	216	0	1,18	0,38
2012-DC4 Z2	12 872	12 589	191	0	0,62	0,66
2012-MT23 Z1	12 884	14 321	176	97	3,49	0,05
2012-MT23 Z2	12 719	12 964	184	0	0,47	0,76
2012-MT24 Z1	9 936	13 038	128	149	2,98	0,07
2012-MT24 Z2	10 250	13 970	131	133	5,98	0,01
2012-PG31 Z1	12 935	13 655	180	0	1,06	0,43
2012-PG31 Z2	4 783	13 165	52	207	29,54	0,00
2012-PG32 Z1	11 306	12 416	184	48	1,86	0,19
2012-PG32 Z2	10 662	10 753	165	0	0,75	0,58
2012-PG8 Z1	12 289	13 656	189	63	2,01	0,17
2012-PG8 Z2	11 783	14 683	172	101	2,74	0,09
<b>Moyenne</b>	<b>10 083</b>	<b>12 626</b>	<b>142</b>	<b>102</b>		
<b>Écart-type</b>	<b>1 988</b>	<b>1 370</b>	<b>39</b>	<b>66</b>		

<sup>1</sup> Modèle quadratique plateau du rendement en variable expliquée et taux post-levée de N en variable explicative (N=15)

**Tableau 58. Rendements et prélèvements N de la parcelle témoin (0 N en post-levée), rendement économique, dose optimale d'azote et valeurs F associées aux modèles de régression de rendement sur la dose de N appliquée en post-levée pour la saison de croissance 2013.**

Site	Rendement du témoin (kg/ha)	Rendement économique (kg/ha) <sup>1</sup>	Prélèvement N du témoin	Dose N optimale (kg/ha) <sup>1</sup>	Valeur F 1	Prob >F 1
2013-BV1 Z1	4 062	10 361	61	191	48,63	0,00
2013-BV1 Z2	4 407	9 071	66	76	2,37	0,14
2013-BV2 Z1	4 974	11 083	74	196	36,78	0,00
2013-BV2 Z2	8 020	12 292	114	139	44,13	0,00
2013-BV3 Z1	4 928	7 659	81	165	6,56	0,01
2013-BV3 Z2	7 239	9 826	113	102	2,36	0,14
2013-BV4 Z1	9 904	13 221	147	148	6,65	0,01
2013-BV4 Z2	12 105	12 398	216	0	0,12	0,97
2013-BV5 Z1	3 475	9 480	57	200	19,94	0,00
2013-BV5 Z2	5 028	10 000	88	200	4,59	0,05
2013-DC1 Z1	6 230	11 486	69	203	29,94	0,00
2013-DC1 Z2	7 209	12 112	93	221	10,78	0,00
2013-DC2 Z1	9 766	12 646	129	176	2,00	0,19
2013-DC2 Z2	7 552	12 380	100	176	2,40	0,14
2013-DC3 Z1	5 223	13 799	65	191	25,38	0,00
2013-DC3 Z2	7 526	12 642	111	224	12,46	0,00
2013-DC4 Z1	7 079	8 818	89	200	1,17	0,39
2013-DC4 Z2	8 611	8 065	109	0	0,56	0,70
2013-DC5 Z1	10 291	11 555	134	59	0,75	0,58
2013-DC5 Z2	5 502	8 391	65	109	0,50	0,74
2013-MO1 Z1	6 569	13 294	78	217	6,36	0,01
2013-MO1 Z2	10 580	13 533	137	129	12,67	0,00
2013-MO2 Z1	4 923	11 162	52	136	31,85	0,00
2013-MO2 Z2	3 931	10 054	46	161	6,55	0,01
2013-MO3 Z1	11 621	13 932	156	122	1,24	0,37
2013-MO3 Z2	4 961	13 440	58	211	64,77	0,00
2013-MO4 Z1	5 376	12 883	62	200	3,83	0,05
2013-MO4 Z2	2 890	8 520	34	200	3,16	0,08
2013-MO5 Z1	4 719	11 896	49	200	43,34	0,00
2013-MO5 Z2	7 708	13 815	90	157	12,24	0,00
<b>Moyenne</b>	<b>6 747</b>	<b>11 327</b>	<b>91</b>	<b>157</b>		
<b>Écart-type</b>	<b>2 050</b>	<b>1 651</b>	<b>31</b>	<b>47</b>		

<sup>1</sup> Modèle quadratique plateau du rendement en variable expliquée et taux post-levée de N en variable explicative (N=15)

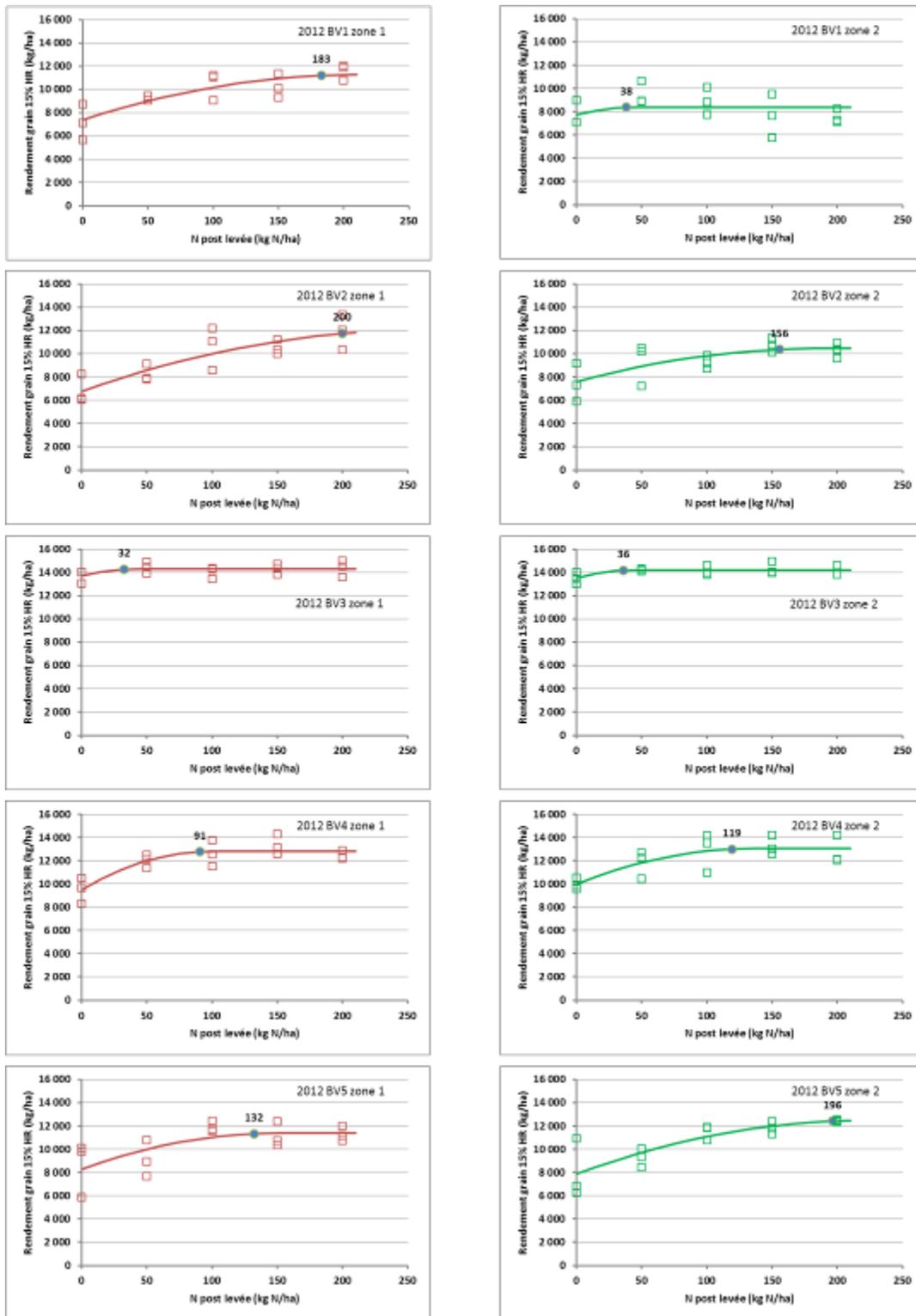


Figure 34. Courbes de réponse à l'azote pour la région de la Baie Lavallière en 2012.

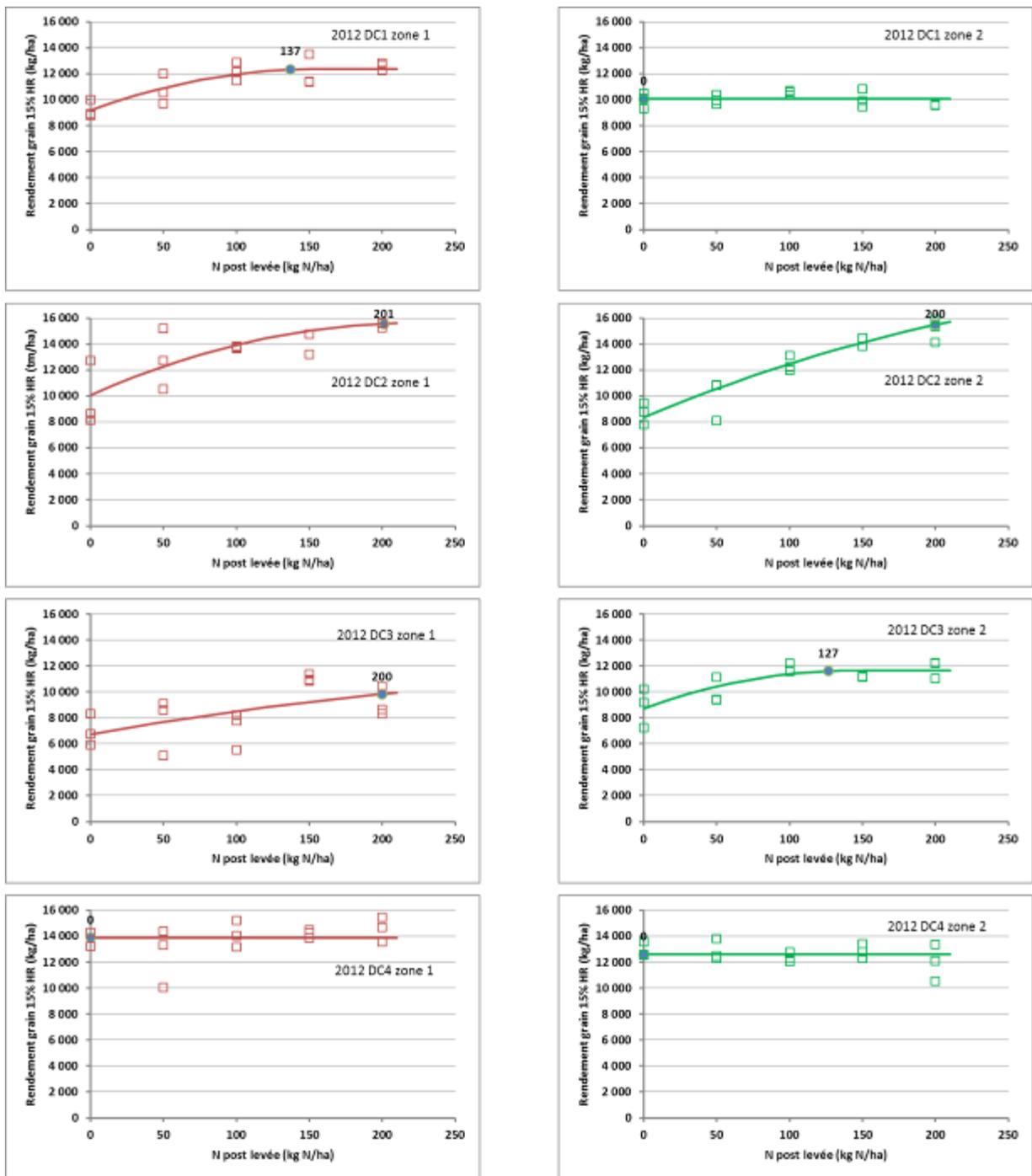


Figure 35. Courbes de réponse à l'azote pour la région de la Baie Missisquoi en 2012.

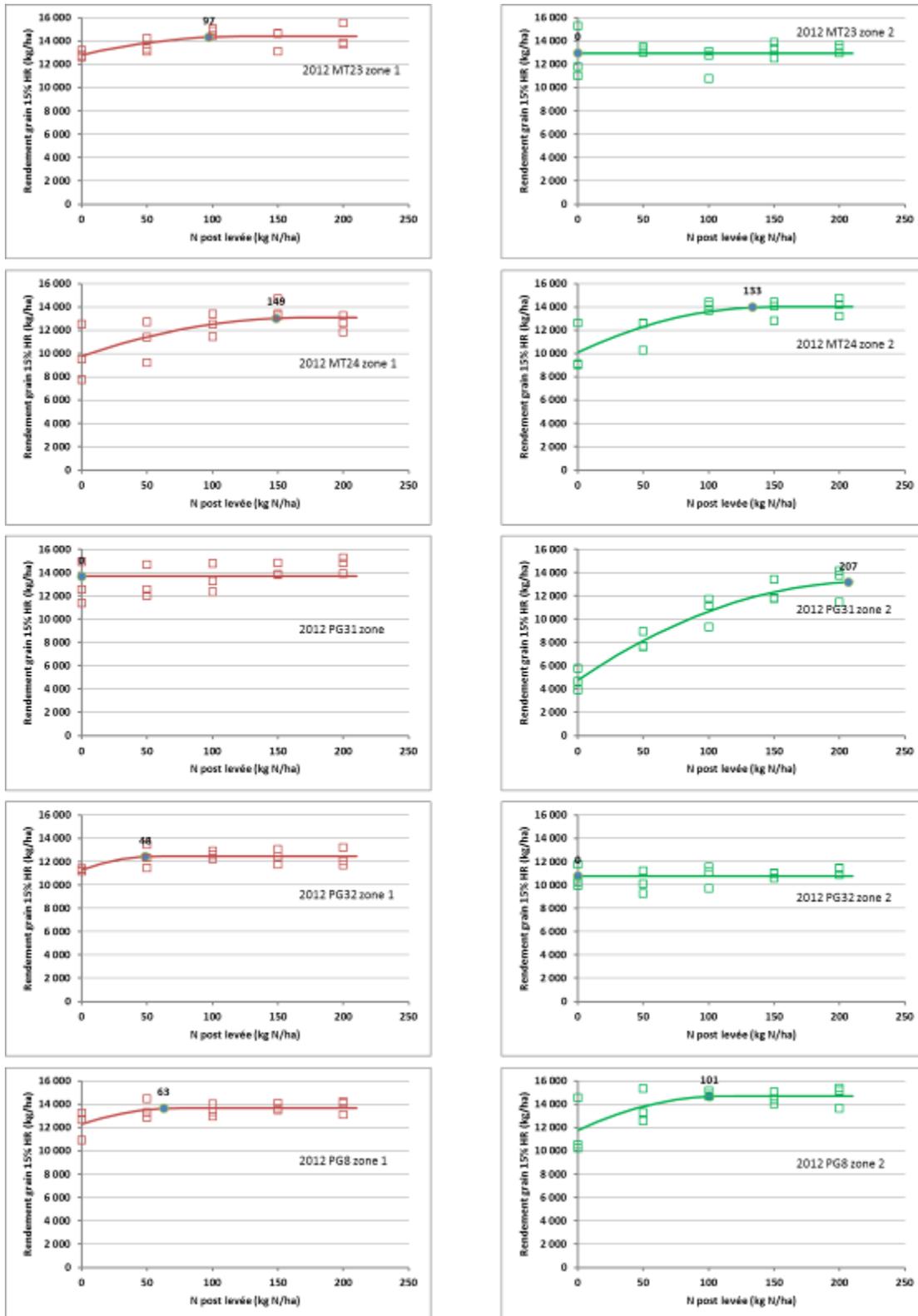


Figure 36. Courbes de réponse à l'azote pour la région de l'Esturgeon en 2012.

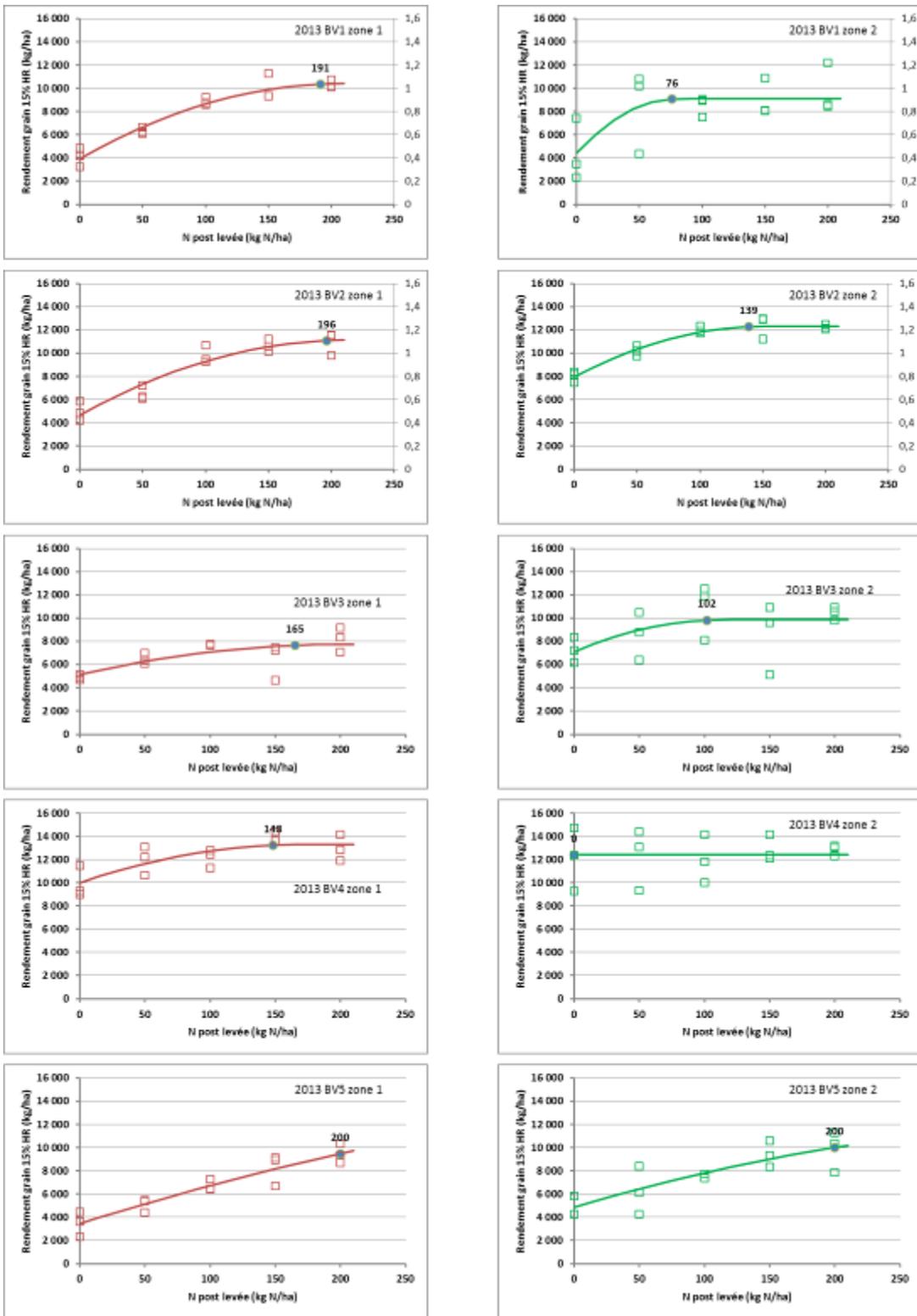


Figure 37. Courbes de réponse à l'azote pour la région de la Baie Lavallière en 2013.

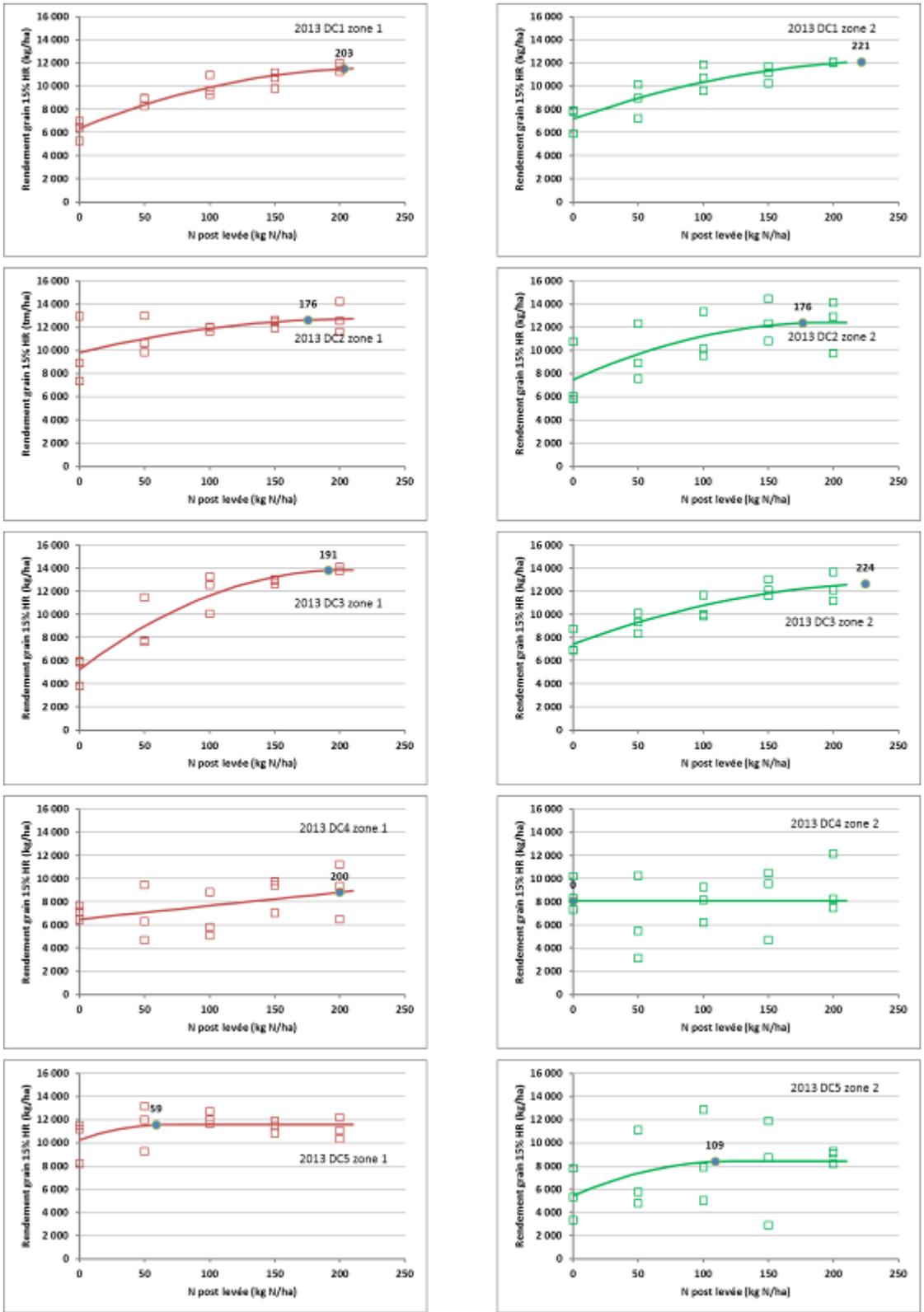


Figure 38. Courbes de réponse à l'azote pour la région de la Baie Missisquoi en 2013.

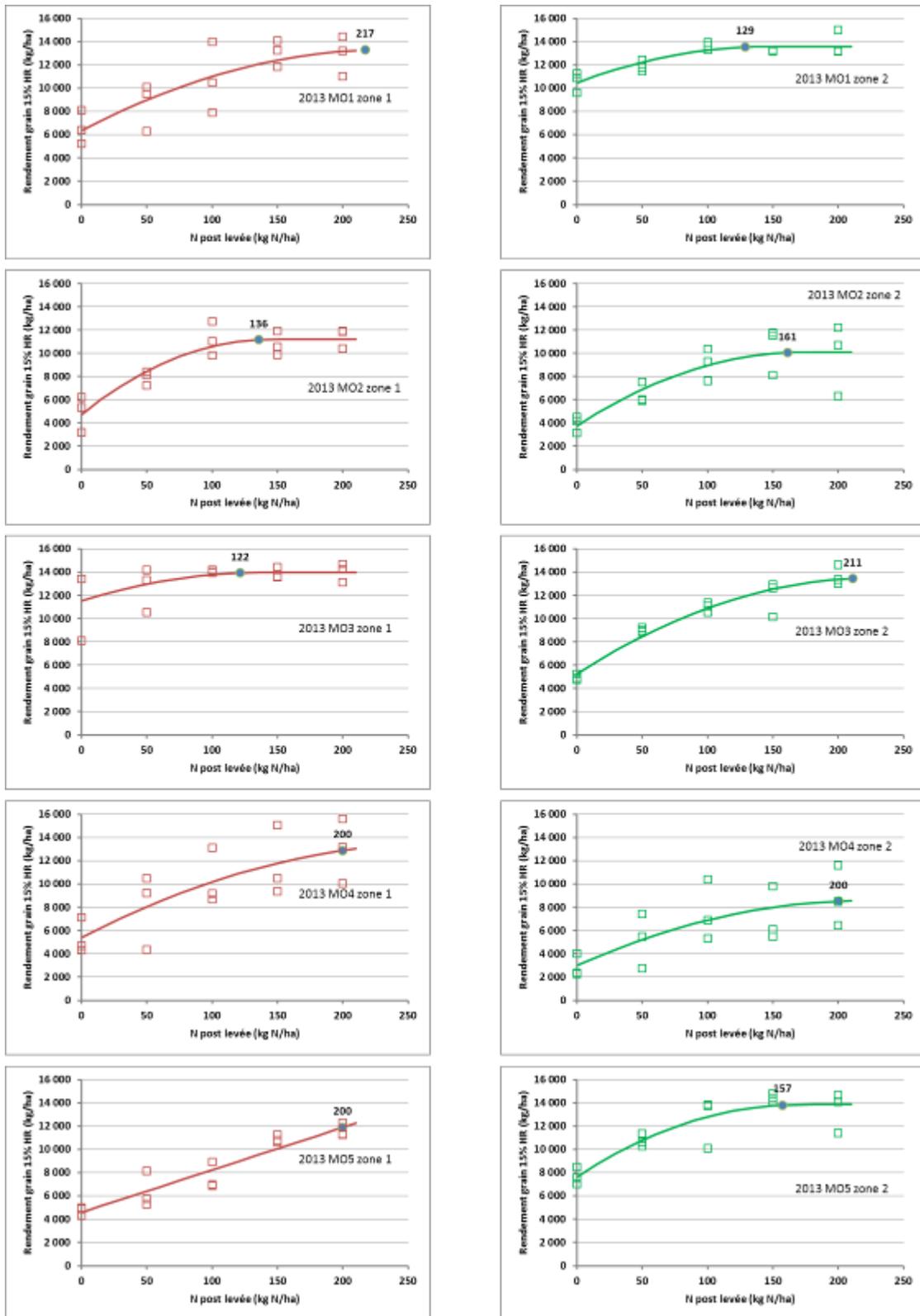


Figure 39. Courbes de réponse à l'azote pour la région de l'Esturgeon en 2013.

L'étude des corrélations présentées au tableau 59 nous renseigne sur les propriétés du sol qui semblent offrir le meilleur pouvoir explicatif du rendement des cultures et du prélèvement de l'azote appliqué en post-levée. Les corrélations des propriétés des sols avec les rendements de culture des parcelles témoins mettent particulièrement en relief l'aptitude intrinsèque du sol à répondre aux besoins en azote de la culture (la fourniture du sol). Ces corrélations confirment la disponibilité de l'azote du sol comme facteur déterminant du rendement des cultures, tel qu'en témoigne la corrélation entre les teneurs des sols en nitrates en post-levée et le rendement des parcelles témoin ( $r=0.61^{***}$ ). Cette contribution à la fertilisation azotée de la culture est tributaire du processus de minéralisation de l'azote organique du sol, tel que suggéré par corrélations significatives observées entre le taux de nitrates en post-levée et les taux de MOS ( $r=0,62^{***}$ ) et de N total du sol ( $r=0.63^{**}$ ). La corrélation positive du rendement des parcelles témoins avec le taux de N total ( $r=0.37^*$ ) et de MOS ( $r=0.36^*$ ) témoigne du même phénomène de fourniture du sol en azote.

**Tableau 59. Corrélations linéaires paramétriques de Pearson entre les rendements des parcelles témoin, les rendements optimaux et les doses optimales de N et les propriétés des sols. (N=59).**

	Rendement témoin (0N)	Rendement au Nop	Dose N optimale
<b>Rendement témoin (0N)</b>		0.56 <sup>***</sup>	-0.71 <sup>***</sup>
<b>Rendement au Nop</b>	0.56 <sup>***</sup>		ns
<b>N optimal</b>	-0.71 <sup>***</sup>	ns	
<b>Teneur en nitrates (post-levée)</b>	0.61 <sup>***</sup>	0.32 <sup>*</sup>	-0.54 <sup>***</sup>
<b>Teneur en sable</b>	ns	ns	ns
<b>Teneur en argile</b>	ns	ns	ns
<b>Taux de matière organique</b>	0.36 <sup>**</sup>	0.26 <sup>*</sup>	ns
<b>Teneur en N total</b>	0.37 <sup>**</sup>	0.27 <sup>*</sup>	-0.25 <sup>*</sup>
<b>Indice de saturation en P</b>	ns	0.29 <sup>*</sup>	ns
<b>Teneur en Mehlich K</b>	ns	0.37 <sup>**</sup>	ns
<b>Teneur en Mehlich Ca</b>	0.27 <sup>*</sup>	0.31 <sup>*</sup>	ns
<b>Teneur en Mehlich Al</b>	-0.38 <sup>**</sup>	-0.47 <sup>***</sup>	ns
<b>Densité apparente (20-40 cm)</b>	-0.38 <sup>*</sup>	ns	ns

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

La contribution du sol à la nutrition azotée de la culture de maïs se traduit en une réduction tangible de la dose complémentaire d'azote minéral nécessaire afin d'atteindre le rendement optimum. La corrélation inverse et significative entre la dose optimale d'azote et le taux de nitrates en post-levée ( $r=0.54^{***}$ ) exprime cette relation. Cette contribution significative du stock de N présent dans le sol fait donc en sorte que la dose optimale de N n'est pas corrélée au rendement optimal, mais plutôt au rendement de la parcelle témoin ( $r=-0.71^{***}$ ). La disponibilité moindre de nitrates en post-levée en 2013 se traduit dès lors par une dose optimale de N généralement plus élevée qu'en 2012. Les hauteurs de précipitations exceptionnellement élevées entre les semis et la période d'apport des engrais en post-levée en 2013 sont vraisemblablement associées à des transferts de nitrates en profondeur, de même qu'à un processus de dénitrification relativement plus actif qu'en 2012. Par ailleurs, les conditions printanières plus sèches en 2012 étaient propices à une minéralisation relativement plus active de l'azote organique du sol. La disponibilité accrue de nitrates en post-levée en 2012 traduirait ainsi l'influence des conditions climatiques sur ces trois facteurs déterminants du devenir de l'azote dans le sol.

La relation entre la teneur du sol en nitrates en post-levée et la dose optimale (figure 40) tend à confirmer le seuil de 20 ppm N au-delà duquel l'apport de N sur le rendement du maïs est marginal (N'Dayegamiye et al., 2009). Si la dose optimale de N est inversement corrélée au taux

de nitrates en post-levée et au taux de matière organique, elle demeure cependant relativement indépendante de la texture du sol. ( $p > 0,05$ ). Dans l'ensemble, les résultats confirment la pertinence de la prise en compte du taux de nitrates du sol dans la formulation de la recommandation d'apport de N en post-levée. L'ajustement du taux d'application de nitrates en 2013 sur la base de la teneur du sol ne permet cependant pas de rattraper les niveaux de rendements optimaux de 2012. Cette différence dans les rendements optimaux entre 2012 et 2013, indique que la disponibilité de l'azote n'est pas le seul facteur déterminant sur la différence interannuelle dans les rendements de maïs, tel que discuté précédemment en référence à l'ajustement des modèles de réponses à l'azote. Hormis l'influence des conditions agroclimatiques discutée précédemment, il est observé que les rendements optimaux tendent légèrement à la baisse en sol plus sableux ( $\text{cor} = -0,31^{**}$  avec le % de sable), reflétant un capital moindre de fertilité naturelle.

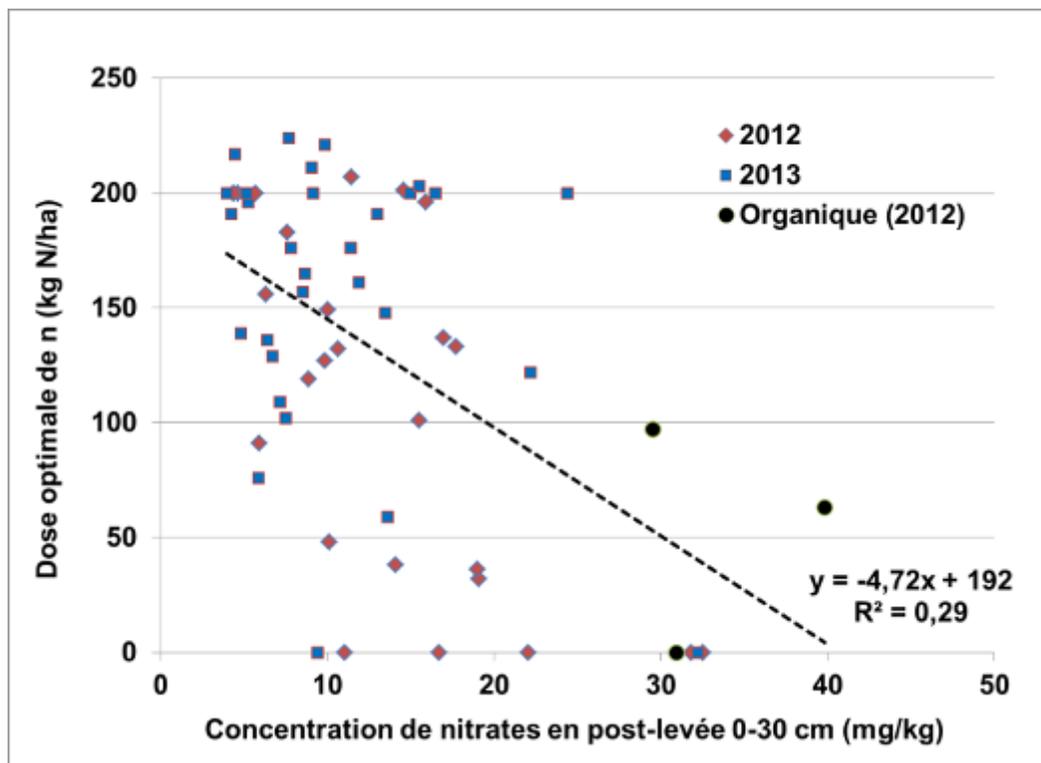
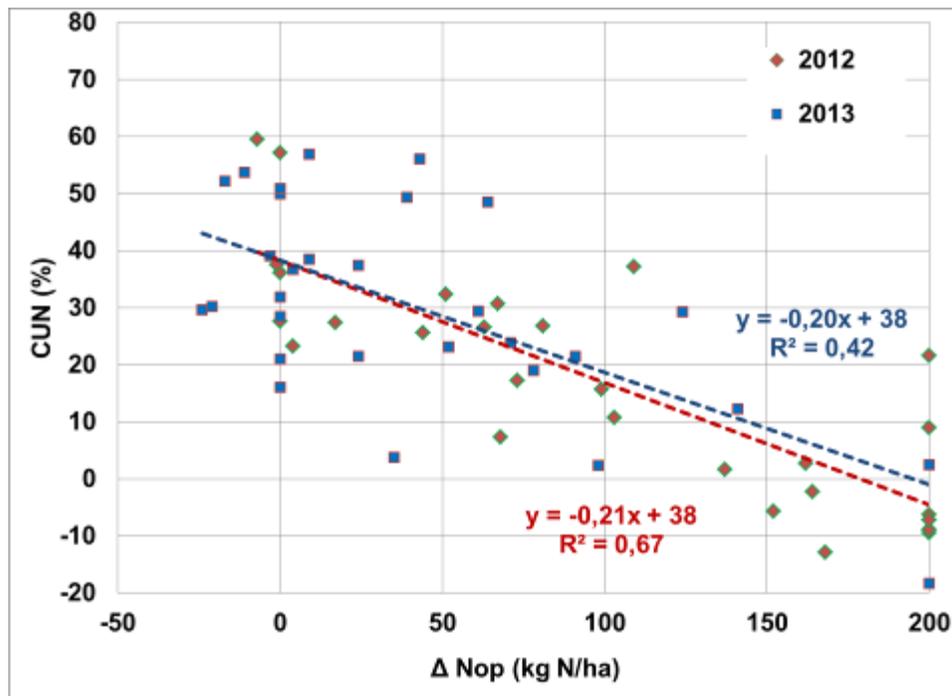


Figure 40. Relation entre la concentration de nitrates en post-levée et la dose optimale de N.

#### 2.1.2.4. Efficacité de l'utilisation de l'azote et des nitrates résiduels

Les nitrates résiduels du sol (NRS) mesurés jusqu'à 60 cm de profondeur au moment des récoltes témoignent du stock d'azote disponible inutilisé par la culture. Compte tenu de l'importante hauteur d'eau qui lessivera le profil du sol jusqu'au printemps prochain, la plus large part de ce stock de nitrates empruntera les voies souterraines pour atteindre le cours d'eau via les drains ou la résurgence de la nappe superficielle. Les observations colligées en 2012 et 2013 dans le réseau de parcelles à l'étude mettent en relief le lien entre le bon ajustement de la fertilisation azotée de la culture et le stock d'azote du sol inutilisé à la fin de la saison de croissance. L'écart entre la dose totale de N appliquée et la dose économique de N ( $\Delta\text{Nop}$ ) est à ce titre un bon indicateur à la fois de l'efficacité de l'azote appliquée et des NRS en fin de saison. Une valeur nulle du  $\Delta\text{Nop}$  traduit un équilibre entre la dose appliquée et le prélèvement de la culture. Une valeur positive est indicatrice d'une sur-fertilisation, alors qu'une valeur négative

indique un déficit dans l'apport de N (sous-fertilisation). La figure 41 illustre la relation entre les indices  $\Delta\text{Nop}$  et les coefficients d'utilisation de l'azote des engrais (CUN) pour l'ensemble des parcelles de référence fertilisées au taux de 150 N en post-levée. Pour les deux années à l'étude, la relation montre une forte diminution du CUN au-delà de la dose économique de N totale, combinant l'application du démarreur (50 N) et l'apport optimal en post-levée. Les modèles de régression linéaire sont pratiquement identiques pour les années 2012 et 2013, ce qui indique que la relation  $\Delta\text{Nop}$ :CUN est relativement indépendante des conditions agrométéorologiques. Ces résultats reflètent ceux obtenus par Tran (1994), Giroux et Lemieux (2006) et Giroux et al.(2009). Au niveau optimal de fertilisation, ( $\Delta\text{Nop}=0$ ), le coefficient de l'utilisation moyen de l'azote des engrais appliqués se situe à 40%. Il diminue à environ 30% en sur-fertilisation de 50 unités de N, pour atteindre une moyenne de 20% à 100 unités de N excédentaires. A 200 unités de N en sur-fertilisation, la valeur du coefficient d'utilisation moyen est nulle.



**Figure 41.** Relation entre le coefficient de l'utilisation de l'azote (CUN) et l'écart entre la dose de N appliquée (150 N) et la dose économique optimale ( $\Delta\text{Nop}$ ).

La figure 42 illustre la relation entre les taux de nitrates résiduels observés en fin de saison et l'indice  $\Delta\text{Nop}$  estimés pour l'ensemble des parcelles de référence fertilisées au taux de 150 N en post-levée. De façon générale, 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. Au taux optimal d'apport de N ( $\Delta\text{Nop}=0$ ), les stocks moyens de N en post-récolte se situent sous la barre de 50 kg N /ha pour les deux années à l'étude. Au taux de sur-fertilisation de 200 kg N/ha, le stock moyen de N se situe entre 90 et 130 kg N/ha. Les sols organiques se distinguent des sols minéraux par des NRS particulièrement élevés en fin de saison, se situant entre 225 et 325 kg N/ha. Le processus de minéralisation de la matière organique en cours de saison de croissance expliquerait ce bilan azoté nettement excédentaire. L'influence du taux de sur-fertilisation azoté ( $\Delta\text{Nop} > 0$ ) sur le stock de nitrates résiduels en fin de saison diffère cependant entre les deux années à l'étude. Les taux de NRS tendent effectivement à être plus élevés en 2012 qu'en 2013. Ce gradient est attribué à la forte pluviosité de l'été 2013, associée à une lame drainée plus importante qu'en 2012, résultant en un lessivage plus important des nitrates. Une telle influence des précipitations sur le devenir des nitrates du sol a aussi été documentée par Giroux et al. (2009). Les auteurs situent néanmoins le seuil critique des teneurs en NRS, en conditions de

précipitations normales, à 80 kg N-NO<sub>3</sub>/ha mesuré en post-récolte du maïs sur une profondeur de 60 cm. Les observations de la présente étude tendent à valider ce seuil critique, alors que ce taux de NRS n'est pas atteint dans les parcelles fertilisées à la dose optimale d'azote ( $\Delta\text{Nop} \leq 0$ ). À titre indicatif, en année de référence 2012, le seuil critique de 80 kg N-NO<sub>3</sub>/ha est atteint en moyenne lorsque l'apport d'azote excède d'environ 100 kg N/ha la dose optimale ( $\Delta\text{Nop} \geq 100$ ).

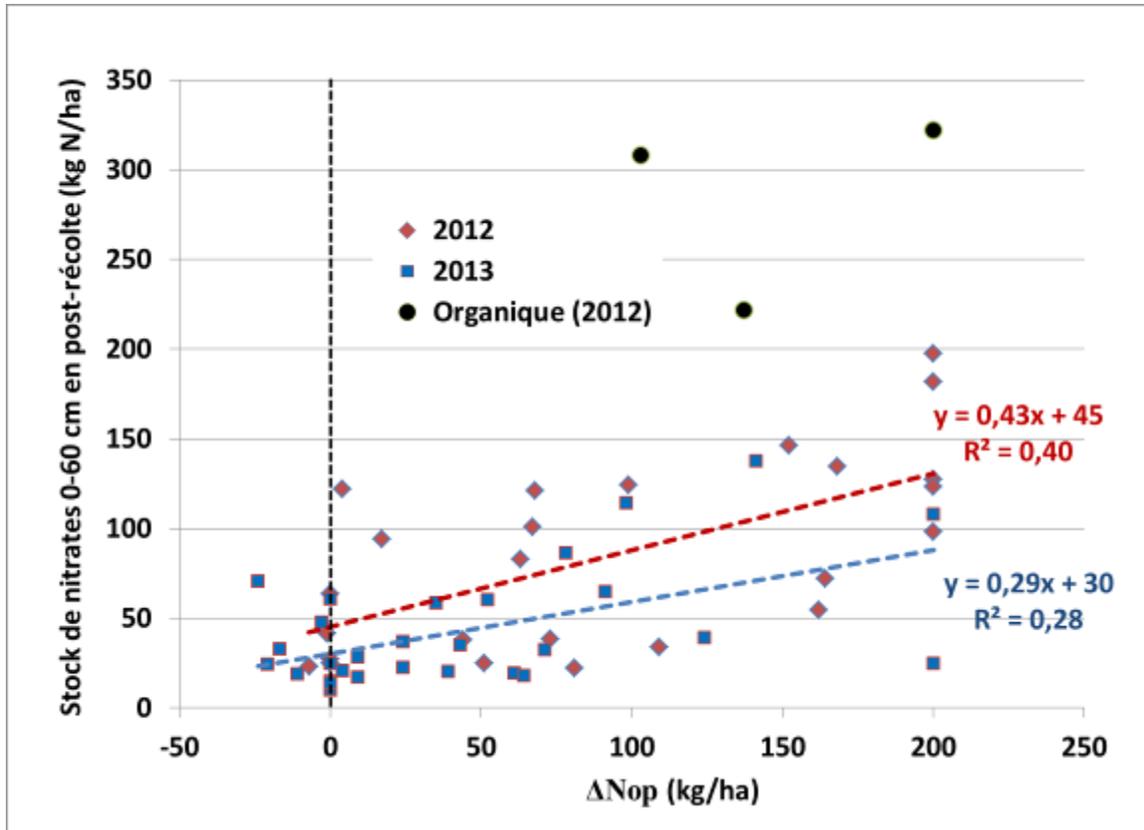


Figure 42. Relation entre le taux de nitrates en post-récolte et l'écart entre la dose totale de N appliquée (démarreur + post-levée) et la dose économique optimale ( $\Delta\text{Nop}$ ).

Les corrélations entre les propriétés des sols à l'étude et les teneurs du sol en nitrates en post-levée et en post-récolte sont présentées au tableau 60. Sans surprise, les taux de MOS et N total du sol sont corrélés avec les taux de nitrates en post-levée comme à celui des nitrates résiduels des parcelles témoins ou fertilisées au taux de référence de 150 N en post-levée. Ces corrélations témoignent des processus de minéralisation de la matière organique en cours de saison de croissance et encourage à une prise en compte de cette contribution dans la formulation des recommandations de fertilisation azotée. Les observations de la présente étude indiquent que cette contribution peut largement excéder le plafond de 45 kg N/ha généralement admis en fertilisation de grandes cultures au Québec (CRAAQ, 2009).

L'effet de la texture du sol sur les teneurs du sol en azote du sol n'est pas significatif. L'absence de corrélation significative entre les teneurs en sable ou argile et les taux de NRS reflètent vraisemblablement les observations de Giroux et al. (2009) sur un réseau d'étude en parcelles suivant un protocole similaire, qui attribue les niveaux de NRS les plus élevés aux textures de sol franches (loam).

Les corrélations entre les indicateurs des propriétés structurales du sol en 2012 (MVA, macroporosité et conductivité hydraulique) et les taux de nitrates résiduels observés suggèrent cependant une influence de ces propriétés physiques favorable à la minéralisation du N en cours

de saison. Cette hypothèse demeure à valider à partir des propriétés physiques des échantillons prélevés en 2013.

Enfin, si le taux de nitrates observé en post-levée est corrélé avec le rendement optimal de la culture de maïs ( $r=0.32^*$ ), ce dernier n'est pas corrélé avec le stock de nitrates présent dans le sol en fin de saison. Cette observation révèle 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, qui ne se traduisent pas par une augmentation du taux de nitrates résiduels du sol. Il y a donc complémentarité entre les objectifs de rendement économique et environnementaux.

**Tableau 60. Corrélations linéaires paramétriques de Pearson entre les teneurs en nitrates en post-levées et en post-récoltes observées dans les parcelles témoin (0 N en post-levée) et fertilisées au taux de référence de de 150 N en post-levée.**

	Teneur en nitrates en post-levée	Teneur en nitrates résiduels	
		Témoin (0N)	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***	
$\Delta$ Nopt (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***
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.

### 2.1.2.5. Variabilité intra-parcellaire et pertinence de la gestion localisée

Globalement, les observations colligées sur les 58 zones de champs à l'étude témoignent d'une importante variabilité dans les rendements des cultures et les réponses à la fertilisation azotée. Tel qu'indiqué par les corrélations entre les rendements et les propriétés du sol rapportées précédemment, cette variabilité est principalement expliquée par les indicateurs du stock d'azote présent dans le sol. Les taux élevés de matière organique du sol et les arrières-effets des engrais de ferme sont des facteurs particulièrement bien mis en relief dans le cadre de cette étude. Une des principales questions adressées par le projet est de déterminer si la prise en compte de cette variabilité, à l'échelle intra-parcellaire, permet d'optimiser le rendement économique de la culture de maïs, tout en réduisant le risque de sur-fertilisation et les pertes d'azote dans l'environnement.

L'approche retenue dans l'appréciation de la faisabilité technico-économique de la gestion localisée des sols consiste à comparer les courbes de réponse à l'azote associées aux deux zones distinctes de gestion retenues pour chacun des champs à l'étude. Compte tenu que tous les champs à l'étude ont profité historiquement d'une régie homogène (précédents culturaux et pratiques culturales identiques, fertilisation uniforme, etc), les différences inter-zones dans les

rendements et les réponses à l'azote sont alors imputables aux seules différences dans les propriétés des sols des deux zones de gestion.

Le tableau 61 présente les résultats des tests statistiques ciblés sur la détection de différences significatives inter-zones dans les courbes de réponse et les doses optimales de N. Un seuil significatif de probabilité associé à la valeur « Fextra » indique que les courbes de réponses à l'azote sont significativement différentes entre les zones de champs et que des doses optimales d'azote distinctes sont dès lors justifiées. Ces dernières sont rapportées pour chacune des zones. À titre indicatif, la dose optimale d'azote commune, combinant les observations des deux zones dans l'évaluation de la réponse à l'azote, permet de comparer l'effet d'une gestion localisée vs uniforme sur la distribution optimale des engrais azotés. La pertinence de la gestion localisée de l'azote est enfin évaluée suivant l'appréciation des différences significatives inter-zones dans les doses optimales de N. Trois scénarios d'apports d'azote en post-levée à l'échelle du champ découlent de cette évaluation, soit :

- l'application d'une dose maximale à l'ensemble du champ (150 N);
- l'application d'une dose uniforme à l'échelle du champ, mais réduite par rapport à la dose maximale;
- l'application de doses distinctes d'azote dans les deux zones, réduites dans l'une ou les deux zones par rapport à la dose maximale (150 N).

Dans l'ensemble, les résultats colligés aux cours des deux saisons de croissance indiquent que des réductions dans les apports de N sont motivées pour 16 des 29 champs à l'étude (55 %), sur la base d'une dose maximale de référence de 150 N appliquée en post-levée (démarreur à 50 kg N/ha). La dose optimale moyenne de N en post-levée pour ces 16 champs se situe à 84 kg N/ha, équivalent à une réduction moyenne de 66 unités N par rapport au scénario de référence (150 N en post-levée). Pour trois de ces champs à dose optimale réduite, la modulation inter-zone de l'apport de N n'est pas justifié. Les doses optimales de 0, 37 et 109 kg N/ha, appliquées uniformément aux zones des trois champs, impliquent une réduction moyenne de 102 unités N par rapport au scénario de référence 150 N. Pour la grande majorité des 16 champs présentant des réductions potentielles d'apport de N, la modulation inter-zone des apports de N est cependant justifiée (13 champs/16; 81 %). La moyenne des doses optimales est de 84 kg N/ha, équivalent à une réduction moyenne de l'ordre de 62 kg N/ha par rapport au scénario de référence.

**Tableau 61. Détection de différences significatives dans les doses optimales d'azote entre les zones du même champ pour l'ensemble des sites à l'étude.**

Site	Région	Test de différence inter-zone		Dose N optimale/zone (kg N/ha)			Pertinence	Evaluation du potentiel de réduction (kg N/ha) <sup>1</sup>			
		Fextra	Prob. de F	Zone 1	Zone 2	1+2		Zone 1	Zone 2	Pondéré 1+2	
2012	BV1	Lavalliere	6,6	0,002	183	38	45	Doses distinctes et réduites	0	112	56
2012	BV2	Lavalliere	1,0	0,391	200	156	191	Dose commune maximale	0	0	0
2012	BV3	Lavalliere	0,2	0,925	32	36	37	Dose commune et réduite	118	114	116
2012	BV4	Lavalliere	0,2	0,906	91	119	109	Dose commune et réduite	0	0	41
2012	BV5	Lavalliere	0,5	0,663	132	196	164	Dose commune maximale	0	0	0
2012	DC1	Missisquoi	15,2	0,000	137	0	111	Doses distinctes et réduites	13	150	81
2012	DC2	Missisquoi	2,3	0,100	200	200	200	Dose commune maximale	0	0	0
2012	DC3	Missisquoi	7,3	0,001	200	127	185	Dose commune maximale	0	23	0
2012	DC4	Missisquoi	3,1	0,043	0	0	0	Dose commune et réduite	150	150	150
2012	MT23	Esturgeon	3,2	0,040	97	0	94	Doses distinctes et réduites	53	150	101
2012	MT24	Esturgeon	1,1	0,369	149	133	145	Dose commune maximale	0	0	0
2012	PG31	Esturgeon	46,1	0,000	0	200	200	Doses distinctes et réduites	150	0	75
2012	PG32	Esturgeon	12,6	0,000	48	0	76	Doses distinctes et réduites	102	150	126
2012	PG8	Esturgeon	1,7	0,189	63	101	90	Doses distinctes et réduites	87	49	68
2013	BV1	Lavalliere	1,0	0,418	191	76	160	Doses distinctes et réduites	0	74	37
2013	BV2	Lavalliere	30,5	0,000	196	139	169	Dose commune maximale	0	11	0
2013	BV3	Lavalliere	5,1	0,007	165	102	102	Doses distinctes et réduites	0	48	24
2013	BV4	Lavalliere	1,2	0,328	148	0	149	Doses distinctes et réduites	0	150	75
2013	BV5	Lavalliere	2,2	0,111	200	200	200	Dose commune maximale	0	0	0
2013	DC1	Missisquoi	1,1	0,367	200	200	200	Dose commune maximale	0	0	0
2013	DC2	Missisquoi	1,2	0,330	176	176	176	Dose commune maximale	0	0	0
2013	DC3	Missisquoi	3,8	0,024	191	200	200	Dose commune maximale	0	0	0
2013	DC4	Missisquoi	n.d.	n.d.	200	0	200	Doses distinctes et réduites	0	150	75
2013	DC5	Missisquoi	6,7	0,002	59	109	91	Doses distinctes et réduites	91	41	66
2013	MO1	Esturgeon	8,6	0,000	200	129	188	Dose distinctes et réduites	0	21	11
2013	MO2	Esturgeon	2,1	0,129	136	161	151	Dose commune maximale	14	0	0
2013	MO3	Esturgeon	22,5	0,000	122	200	182	Dose distinctes et réduites	28	0	14
2013	MO4	Esturgeon	5,5	0,005	200	200	200	Dose commune maximale	0	0	0
2013	MO5	Esturgeon	25,8	0,000	200	157	200	Dose commune maximale	0	0	0

<sup>1</sup> Le potentiel de réduction associé à la dose optimale est estimé par rapport à la dose maximale de référence de 150 N en post-levée.

Bien que la majorité des champs à l'étude offre l'opportunité de réduire les apports de N, les réductions potentielles varient d'une région d'étude à l'autre. Le gradient régional favorise les sites du bassin de la Baie Missisquoi, où 4 des 9 champs à l'étude affichent une réduction potentielle moyenne de 93 kg N/ha. Dans le bassin de l'Esturgeon, la moyenne des réductions potentielles des apports de N se situe à 66 kg/ha, applicable à six des dix champs à l'étude. Enfin, la moyenne des réductions potentielles des six champs à l'étude dans le bassin Lavallière, sur un total de dix, est de 59 kg/N/ha, toujours estimée par rapport à la dose de référence de 150 N en post-levée..

Rappelons cependant que les conditions agroclimatiques fortement contrastées entre les saisons 2012 et 2013 ont eu un effet considérable sur les doses optimales de N estimées pour l'ensemble des parcelles à l'étude. Ce gradient annuel se traduit en réductions potentielles des apports de N beaucoup moins importantes en 2013 que celles estimées en 2012. La moyenne des réductions d'apports de N en 2012 pour neuf champs, sur un total de 14, se situe à 91 kg N/ha. La réduction potentielle moyenne des apports de N pour sept des 15 champs à l'étude en 2013 est deux fois moins importante, à 43 kg N/ha. Ce gradient saisonnier dans l'efficacité de l'azote des engrais est attribué principalement à l'effet des hauteurs de précipitations très élevées au cours de la saison 2013 sur les processus de dénitrification, d'entraînement des nitrates en profondeur

et d'altération de la condition physique du sol. Le contraste particulièrement marqué dans les doses optimales de N estimées dans la région de l'Esturgeon entre les deux saisons de croissance à l'étude s'expliquerait en partie par la nature argileuse des sols. Les textures lourdes des sols de la région d'étude feraient en sorte d'accroître leur vulnérabilité aux processus de dénitrification et de dégradation de la condition physique du sol en présence de conditions d'humidité excessive. Ainsi, seuls deux champs sur cinq en 2013 offrent de relativement maigres opportunités de réduire l'apport en azote. À l'inverse, lors de conditions agroclimatiques favorables en 2012, les sols ont pu exprimer leur plein potentiel de fertilité. Des réductions substantielles des apports en azote étaient déterminées pour quatre des cinq champs à l'étude dans la région.

Au plan environnemental, l'impact de conditions de pluviosité élevée en saison de croissance s'inscrit donc en double sur les risques de pertes d'azote dans l'eau de surface. D'une part, l'augmentation de la hauteur d'eau drainée implique un entraînement plus important de nitrates vers les drains souterrains et le cours d'eau. D'autre part, ce tribut prélevé dans la couche arable du sol entraîne la dose optimale d'engrais azoté à la hausse. Si le recours au dosage des nitrates en post-levée permet un certain « contrôle à l'entrée » en prévenant la sur-fertilisation de la parcelle, elle ne permet cependant pas de retenir les nitrates dans le profil du sol. Cette étude démontre ainsi l'intérêt de considérer un « contrôle à la sortie » des nitrates, complémentaire à l'approche des apports sur mesure. Le drainage contrôlé, permettant de maintenir la nappe d'eau plus élevée en saison de croissance, mérite certainement notre attention dans la perspective de réduire les exportations de nitrates depuis la couche arable jusqu'au cours d'eau.

### 2.1.3. Volet économique

L'analyse sommaire de la faisabilité économique de la gestion localisée des sols s'inspire des résultats du volet agronomique, en mettant notamment à profit les réductions potentielles d'apports d'engrais minéraux dérivées des essais à la ferme. Ce volet d'étude a également mis à contribution les conseillers des clubs-conseils en agroenvironnement, lesquels ont participé à l'interprétation des coûts associés à la mise en œuvre d'une approche de gestion localisée auprès de leur clientèle. La présente section du rapport présente la démarche et les principales conclusions découlant de cette analyse de rentabilité de la gestion localisée.

#### 2.1.3.1. Approche méthodologique

Les avantages économiques liés au fractionnement temporel de la fertilisation azotée sont relativement bien documentés. Cette section suggère une approche pour évaluer la rentabilité du fractionnement plutôt sur une base spatiale. Pour y arriver, la méthode privilégiée est celle du budget partiel (BP). Cette méthode d'analyse marginale est appropriée lorsque les changements prévus à une entreprise agricole ne requièrent pas une restructuration majeure de celle-ci<sup>3</sup>. Plutôt, les changements prévus aux modes de production ne concernent que certaines ressources bien spécifiques, lesquelles peuvent être changées sans modifier les opérations principales de l'entreprise (ex. : changement de type d'élevage, changements de cultures nécessitant le changement de la majeure partie de la machinerie, etc.).

---

<sup>3</sup> Castle, Emery N., Becker, M.H., Nelson, A.G. *Farm Business Management – The Decision-Making Process*. Macmillan Publishing Company. 1987. 413 pages.

Le BP consiste à évaluer les changements prévus selon les éléments présentés dans la matrice suivante :

	<b>Amélioration de la rentabilité</b>	<b>Détérioration de la rentabilité</b>	<b>Total</b>
<b>Effets revenu</b>	Revenus en plus (A)	Revenus en moins (B)	$G = A + B$
<b>Effets coût</b>	Coûts en moins (C)	Coûts en plus (D)	$H = C + D$
<b>Total</b>	$E = A + C$	$F = B + D$	Solde de rentabilité $E + F = G + H$

Dans le cas du fractionnement spatial de la fertilisation azotée, l'amélioration de la rentabilité se situe surtout au niveau des coûts de fertilisation en moins, dans le cas où le fractionnement permet une réduction de la fertilisation. Du côté de la détérioration de la rentabilité, celle-ci est associée au coût d'acquisition des équipements de géolocalisation ainsi que les frais d'exploitation annuels relatifs à celle-ci. Cependant, il peut être difficile d'estimer les coûts d'acquisition d'un système de géolocalisation. En contrepartie, en connaissant les économies au chapitre des coûts de fertilisation, ainsi que les frais d'exploitation de la géolocalisation, il est possible d'évaluer le coût d'acquisition maximal à payer pour que le fractionnement spatial soit rentable dans le cadre d'une analyse par BP.

L'analyse est effectuée sur la base de certaines hypothèses, autour desquelles une analyse de sensibilité est assurée. Premièrement, sur la base des résultats agronomiques, deux réductions possibles de fertilisation azotée sont considérées, soit 37 et 70 kg N/ha, et le prix utilisé est de 2,00 \$/kg N. De plus, la superficie moyenne d'un champ où le fractionnement spatial est effectué est de 10 hectares. Par conséquent, la gestion de la fertilisation est doublée par tranche de 10 ha. Pour ce qui est des frais d'exploitation liés au système de géolocalisation, ceux-ci se fondent sur l'expertise agronomique des collaborateurs au projet. Enfin, la superficie totale de la production de maïs par ferme est basée sur l'Étude sur les coûts de production des céréales, du maïs grain et des oléagineux en 2009 au Québec (CECPA, 2011), c'est-à-dire 172,5 ha.

### 2.1.3.2. Résultats

#### a) Frais d'exploitation de la géolocalisation :

La géolocalisation comporte certains frais d'exploitation qui s'ajoutent aux coûts d'amortissement des équipements. Ces frais sont de trois ordres, soit l'échantillonnage et l'analyse des sols, le géopositionnement ainsi que les services-conseils. Ces frais ont été estimés avec l'aide des collaborateurs au projet qui ont estimé les montants relatifs à chacun des frais. En agrégeant l'information recueillie, les frais d'exploitation de la géolocalisation sont établis à 25 \$/ha, tel que présenté au tableau 62.

**Tableau 62. Frais d'exploitation de la géolocalisation**

<b>Frais d'exploitation</b>	<b>\$/ha</b>
<b>Échantillonnage et analyse</b>	15
<b>Géopositionnement</b>	5
<b>Services-conseils</b>	5
<b>Total</b>	<b>25</b>

En considérant ces montants, de même que les hypothèses présentées précédemment, un budget partiel au solde de nul se présenterait comme au tableau 63.

**Tableau 63. Budget partiel au solde nul pour une réduction de fertilisation azotée de 37 \$/ha.**

	Amélioration de la rentabilité	Détérioration de la rentabilité	Total
<b>Effets revenu</b>	<i>Revenus en plus (A) :</i> 0 \$/ha	<i>Revenus en moins (B) :</i> 0 \$/ha	$G = A + B$ 0 \$/ha
<b>Effets coût</b>	<i>Coûts en moins (C) :</i> • Fertilisation = (74 \$/ha)	<i>Coûts en plus (D) :</i> • Géolocalisation = ▪ Frais d'exploitation = 25 \$/ha ▪ Amortissement = 49 \$/ha	$H = C + D$ 0 \$/ha
<b>Total</b>	$E = A + C$ (74 \$/ha)	$F = B + D$ 74 \$/ha	Solde de rentabilité $E + F = G + H$ 0 \$/ha

b) Coûts d'amortissement de la géolocalisation :

En considérant les données du tableau 73, une superficie moyenne cultivée en maïs-grain de 172,5 ha et une période d'amortissement linéaire de 12 ans, le coût d'acquisition du système de géolocalisation ne devrait pas dépasser 101 430 \$ pour assurer la rentabilité. Si l'on considère une économie de fertilisation s'élevant à 70 kg N/ha, le coût d'acquisition pourrait alors s'élever à 238 050 \$. Dans le cas où aucune réduction de fertilisation azotée n'est possible, il n'y a évidemment pas d'incitatif pour un producteur à investir dans un système de géolocalisation.

c) Analyse de sensibilité

L'analyse opérée dans les lignes précédentes se fonde sur un coût de l'azote de 2,00 \$/kg N et évidemment, ce coût fluctue d'une année à l'autre. Dans le cas où le coût du fertilisant se situerait à 1,75 \$/kg N, le coût d'acquisition du système de géolocalisation devrait se limiter à 82 282 \$ si la réduction de l'azote est de 37 kg/ha et de 201 825 si la diminution est plutôt de 70 kg/ha.

Ces résultats peuvent indiquer que l'investissement dans un système de géolocalisation sera rentable la plupart du temps. En effet, il serait étonnant qu'un tel système coûte systématiquement 100 000 à 200 000 \$ à l'acquisition pour toute entreprise agricole. Or, il faut préciser que les résultats agronomiques montrent que ce n'est pas dans tous les cas que des réductions de fertilisant sont possible. Ainsi, si l'analyse de sensibilité est opérée sous l'angle inverse et que l'investissement dans un système de géolocalisation est plutôt fixé à 50 000 \$, le seuil de rentabilité serait alors atteint du moment qu'une réduction de 24 kg N/ha ou plus serait obtenue.

## 2.1.4. Volet hydrologique

Au niveau environnemental, l'application des principes de la gestion intégrée et localisée est porteuse de bénéfices importants, notamment au niveau de la réduction de l'exportation diffuse des nutriments vers le réseau de surface. Les dispositifs de suivi en bassins versants opérés par l'IRDA au cours des 15 dernières années situent les exportations annuelles d'azote entre 20 et 65 kg N/ha. Cet apport n'est pas sans effet sur les milieux aquatiques compte tenu du rôle de l'azote dans les processus d'eutrophisation des plans d'eau et de prolifération de cyanobactéries, mis à jour plus récemment sous nos conditions climatiques (Pearce et coll., 2010). La réduction à la source des apports excédentaires de N par une meilleure prise en compte de la fourniture du sol et des amendements organiques constitue la meilleure ligne de défense au niveau des exportations par les drains vers les eaux de surface ou vers l'aquifère.

Le volet hydrologique du projet ReZoTaGe avait pour objectif d'évaluer les retombées de scénarios de gestion localisée de l'azote sur les pertes de nitrates vers les cours d'eau. La démarche s'est appuyée sur les suivis hydrologiques de deux bassins versants de la Montérégie opérés par l'équipe de l'IRDA en collaboration avec ses partenaires régionaux. Le recours à des modèles hydrologiques calés et validés à partir des flux d'eau et de nitrates observés aux exutoires des bassins à l'étude, a permis de traduire les réductions potentielles dans les apports d'azote au champ, dérivées du volet agronomique du présent projet, en atténuation des flux de nitrates aux exutoires des ruisseaux.

### 2.1.4.1. Description des sites expérimentaux

Les deux bassins versants retenus pour le volet hydrologique du projet ReZoTaGe font partie du bassin de la rivière aux Brochets, en Montérégie-Est (figure 43). Les deux bassins sont de superficies comparables (6 et 8 km<sup>2</sup>) et se distinguent du point de vue topographique et pédologique. Le bassin Walbridge amont, occupe une position plus élevée dans le paysage (altitudes de 73 à 102 m) que le bassin Walbridge aval (60 à 82 m) (figure 44). Son relief est aussi plus ondulé (avec une pente moyenne de 1,2 %) et ses sols sont dans une plus forte proportion bien drainés que dans le bassin aval (44 % vs 17 %).

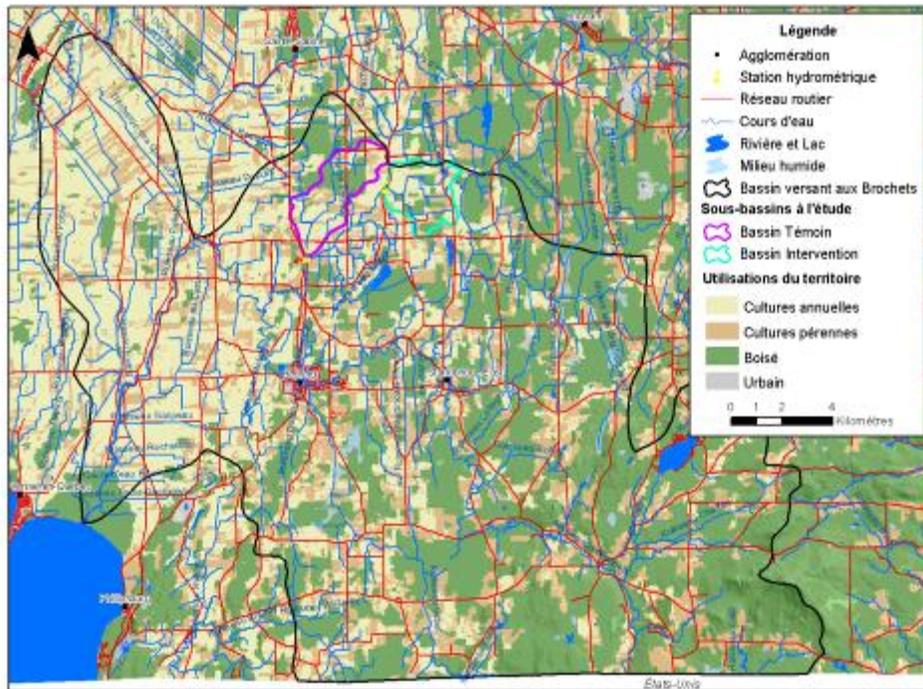


Figure 43. Localisation des bassins d'études du ruisseau Walbridge.

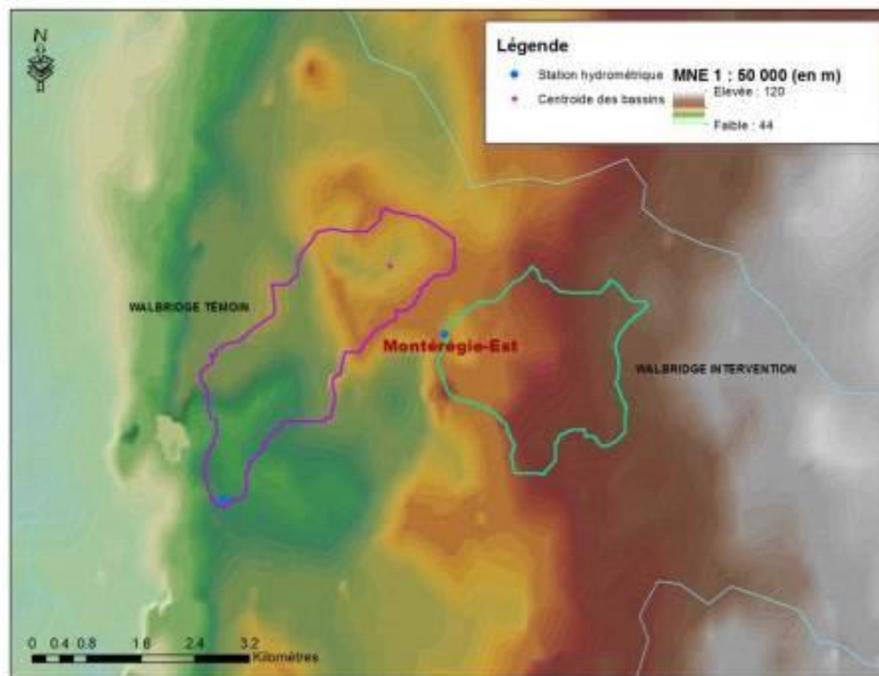


Figure 44. Élévation des bassins d'études du ruisseau Walbridge.

Plus de 60 % de la superficie des bassins Walbridge est en culture, avec une forte dominance des cultures de maïs-grain. Le bilan des apports en phosphore, plus élevé dans le bassin amont que dans le bassin aval (27 vs 12 kg P/an), reflète la présence plus marquée d'élevages de volailles et de porcs. Les bilans agronomiques pour l'azote (besoins des cultures - apports

efficaces) sont équivalents (- 15 et - 16 kg/an). Le tableau 64 présente les caractéristiques générales des deux bassins versants Walbridge tandis que le tableau 65 précise les groupes hydrologiques des sols qu'on y retrouve.

**Tableau 64. Caractéristiques générales des bassins versants Walbridge amont et aval.**

	Amont	Aval
<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>	6,3	7,9
<b>Altitude moyenne</b>	86	71
<b>Min</b>	73	60
<b>Max</b>	102	82
<b>Pente moyenne (5)</b>	1,2	0,6
<b>Principales séries de sols (texture et drainage)*</b>		
<b>Shefford (loam graveleux bien drainé)**</b>	44	17
<b>Rubicone (loam sableux imparfaitement drainé)</b>	0	15
<b>Milton (loam sableux mal drainé)**</b>	54	42
<b>Terre Noire (très mal drainé)</b>	0	24
<b>Occupation du sol</b>		
<b>Cultures annuelles</b>	53	49
<b>Cultures pérennes</b>	8	14
<b>Forêts</b>	32	28
<b>Autres</b>	7	9
<b>Bilan annuel des apports en P (kg/ha)</b>	19	12
<b>Bilan agronomique annuel des apports en N (kg/ha)</b>	-15	-16

Tiré de Michaud et al. (2004c)

\* Proportion (%) de la superficie totale du bassin

\*\* Série de sol correspondant à des unités pédologiques homogènes et à 50 % des unités du complexe Milton-Shefford.

**Tableau 65. Représentativité des groupes hydrologiques des bassins Walbridge Intervention et Témoin.**

Gr. Hydro	Intervention	Témoin
<b>A (1)</b>	--	< 1%
<b>B (2)</b>	20%	--
<b>C (3)</b>	80%	74%
<b>D (4)</b>	--	26%

#### 2.1.4.2. Mesures de terrain et traitement des données

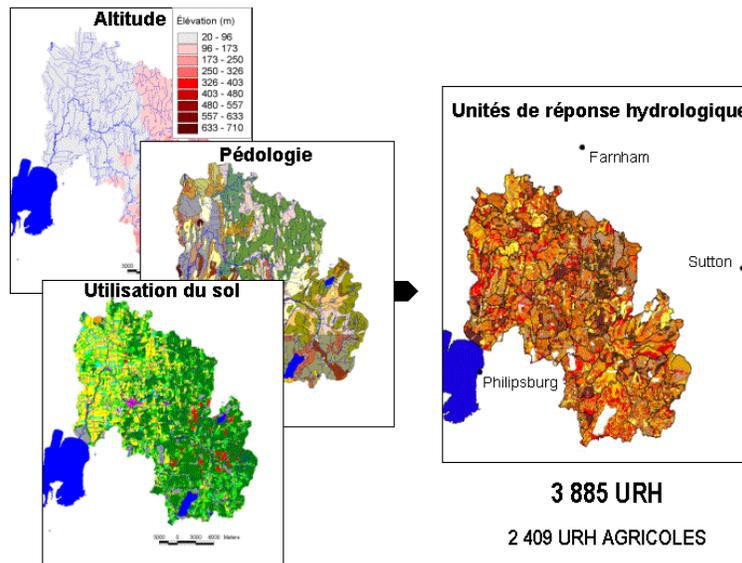
L'exercice de calage et validation de la modélisation hydrologique de cette étude s'est appuyé sur les données agronomiques et hydrométriques acquises dans le cadre du *Réseau d'actions concertées en milieu agricole* (Michaud et al., 2004c et Michaud et al., 2009) durant la période 2001-2006. Pour une description détaillée de la méthodologie, des observations de qualité de l'eau et de leur traitement statistique, le lecteur est invité à consulter le rapport de recherche de Michaud et al. (2004c)

Les mesures en continu du débit des cours d'eau couplés aux dosages ponctuels de la qualité de l'eau ont permis d'établir les flux de MES, P et N à l'exutoire des bassins versants pour la période d'étude 2001-2006. L'enregistrement du signal géochimique (conductivité électrique/turbidité) aux exutoires des bassins au moyen de multisondes en 2005 et 2006 (Michaud et al., 2009) a pour sa part fourni une information complémentaire et fort pertinente pour le calibrage du modèle, soit la séparation des écoulements de surface et souterrain contribuant au débit global du cours d'eau.

### 2.1.4.3. Description du modèle SWAT

Le modèle SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*, Arnold et al. 1998) est un modèle déterministe semi-distribué ayant un pas de temps sous-journalier ou journalier. Il a été développé, à partir des années 1970, par des chercheurs états-unis, pour appuyer les initiatives de réduction des sources diffuses de pollution des eaux de surface. Ce logiciel, couplé au système d'information géographique (SIG) ArcGIS (ESRI), constitue un outil bien intégré sur le plan agronomique et hydrologique et est largement utilisé en Amérique du Nord et en Europe (Santhi et al., 2001 ; Neitsch et al., 2002b; Arnold et Fohrer, 2005; Deslandes et al. 2007; Michaud et al. 2007).

SWAT permet d'analyser et de prédire les transferts hydriques et la mobilité des sédiments, des nutriments et des pesticides, à l'échelle de grands bassins versants hétérogènes, de quelques centaines d'hectares à plusieurs milliers de kilomètres carrés et sur des périodes allant de quelques heures à plusieurs années. L'hétérogénéité d'un grand bassin versant et de son fonctionnement hydrologique est prise en compte par son découpage en sous-bassins, puis en unités de réponses hydrologique (URH). Chaque URH est caractérisée par son appartenance à un seul sous-bassin et par une combinaison unique de propriétés édaphiques et de modalités d'utilisation du sol. La figure 45 illustre le découpage du bassin de la rivière aux Brochets en URH, obtenu à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT), d'une carte pédologique et d'une carte d'utilisation du sol.



**Figure 45. Représentation spatiale des unités de réponse hydrologique (URH) pour le bassin versant de la rivière aux Brochets.**

Le modèle SWAT est composé de plusieurs modules, eux-mêmes formés d'un ensemble d'algorithmes. Parmi ceux-ci, certains simulent les processus se déroulant dans le sol ou à la surface de celui-ci (phase terrestre du modèle) et d'autres reproduisent les processus localisés dans les cours d'eau (phase aquatique).

Ainsi, les équations de la **phase terrestre** du modèle permettent de calculer de façon journalière, mensuelle ou annuelle, pour chaque URH, l'évolution des stocks terrestres de nutriments, la croissance et les prélèvements par les plantes, de même que les transferts d'eau, de sédiments et de nutriments vers le réseau hydrographique. Celles de la **phase aquatique** simulent de

nombreux phénomènes tels que les transferts d'eau d'un tronçon de rivière à un autre, l'érosion des berges, le transport, la déposition et la remise en suspension des sédiments, l'adsorption, la déposition et la remise en suspension des nutriments. Les principales composantes prises en compte par le modèle SWAT pour simuler les phénomènes responsables de la pollution diffuse des eaux de surface sont sommairement décrites ci-après.

#### 2.1.4.3.1. Composantes hydrologiques

À l'exutoire d'un bassin versant, le débit du cours d'eau est principalement alimenté par trois types d'écoulement :

- ◆ L'écoulement « de base » qui provient des nappes d'eau souterraines. C'est un écoulement lent et retardé du fait du passage de l'eau dans le sol et le sous-sol.
- ◆ L'écoulement « hypodermique » ou « latéral », qui provient de la couche superficielle du sol et des drains.
- ◆ Le ruissellement, qui correspond à l'écoulement direct de l'eau à la surface du sol.

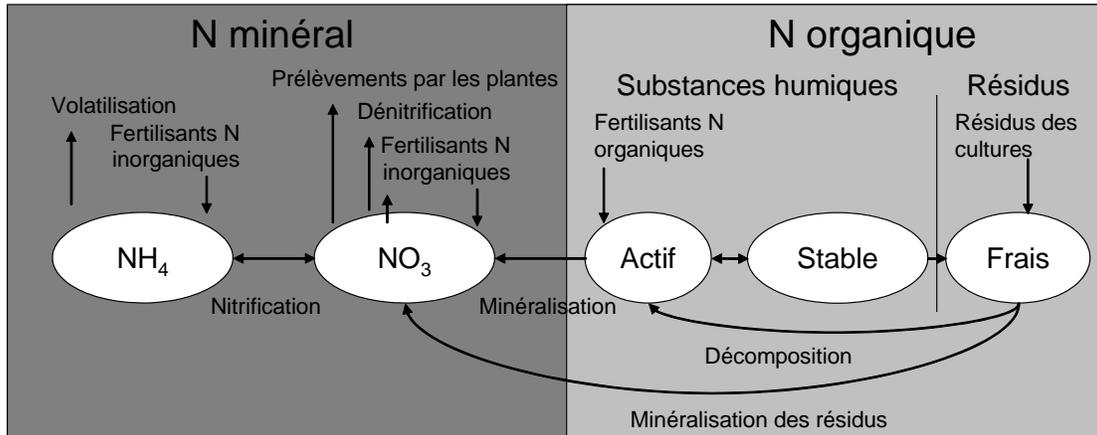
Pour le modèle SWAT, les précipitations constituent en quelque sorte l'impulsion nécessaire aux mouvements de l'eau en surface et dans le sol ainsi qu'au transport des sédiments et des nutriments. Une partie des eaux de pluie et de fonte de neige ruisselle, l'autre s'infiltré dans le sol. Là, elle percole d'une couche de sol à l'autre (quand la capacité au champ de la couche supérieure est atteinte), pour rejoindre les drains agricoles ou l'aquifère peu profond (nappe de surface) et, éventuellement, l'aquifère profond (nappe profonde). Ce sont le ruissellement et l'eau en provenance des sols et de la nappe de surface qui alimentent les cours d'eau.

La répartition ruissellement/infiltration est déterminée par la méthode du numéro de courbe du Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1972). Selon cette méthode, un numéro de courbe (CN) est attribué à chacune des URH en fonction du groupe hydrologique du sol, du type d'utilisation du sol, ainsi que des pratiques agricoles le cas échéant. Le CN est par la suite ajusté quotidiennement selon le contenu en eau du sol. L'eau du sol disponible pour répondre aux besoins des plantes est calculée à partir de la pluviométrie, du ruissellement, de l'évapotranspiration, de la percolation et de l'écoulement latéral. Les besoins en eau des plantes (ainsi d'ailleurs que ceux en N et P) de même que l'évapotranspiration du sol et des plantes sont établis par des équations qui tiennent compte notamment de l'accumulation d'unités de chaleur. L'évapotranspiration est calculée en fonction de l'évaporation de l'eau en surface des plantes et du sol, ainsi que de la transpiration des plantes (elle-même liée à l'eau du sol, à la température et au stade de développement des plantes).

#### 2.1.4.3.2. Composantes du cycle terrestre de l'azote

L'azote est un élément extrêmement réactif et est très mobile. Dans la nature, il se retrouve sous plusieurs formes, de très oxydé ( $\text{NO}_3^-$ ) à très réduit ( $\text{NH}_4^+$ ). En phase terrestre, SWAT simule les transferts journaliers entre cinq différents réservoirs d'azote dans le sol (figure 46). Trois réservoirs correspondent aux formes organiques de l'azote, deux aux formes minérales. L'azote organique *frais* est associé aux résidus de culture et à la biomasse microbienne, alors que l'azote associé à l'humus du sol est réparti entre le réservoir *actif* et le réservoir *stable*. La minéralisation de l'azote organique ne s'effectue qu'à partir du réservoir *actif* des substances humiques et du réservoir *frais* des résidus (Jones et al., 1984). La décomposition des résidus de cultures contribue, tout comme la fertilisation organique, au réservoir organique *actif*. Les formes minérales d'azote sont pour leur part subdivisées en deux réservoirs: nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) et ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ).

L'azote peut être introduit dans le système par application de fertilisants (minéraux et organiques), par les résidus de culture, par fixation de l'azote atmosphérique ou par la pluie. Lors d'une application d'engrais de ferme ou d'engrais minéraux, le modèle redistribue les quantités de N appliquées dans les réservoirs appropriés, en tenant compte de la profondeur d'incorporation et de la nature du fertilisant. La redistribution du N dans le profil du sol, sous l'action biologique ou du travail du sol, est également simulée.



Tiré de Neitsch et al., 2002a

**Figure 46. Composantes du cycle terrestre de l'azote modélisé par SWAT.**

De façon journalière, le modèle estime l'exportation en provenance des URH de l'azote organique et des nitrates (via le ruissellement et l'écoulement souterrain). Un facteur d'enrichissement des sédiments et du ruissellement en N, lié aux types de sol et de culture, permet d'ajuster les formes d'azote exportées vers le réseau hydrographique. Dans les cours d'eau, SWAT évalue également l'ammonium transporté d'un tronçon du cours d'eau à un autre.

#### 2.1.4.4. Étape de mise en place du modèle

La procédure suivie pour la préparation de SWAT est celle décrite par Di Luzio et al. (2002). Ses principales étapes comprennent le paramétrage et le calage du modèle puis sa validation. Par la suite, le modèle peut être mis en œuvre pour simuler différents scénarios, comme c'est le cas dans cette étude pour différentes doses d'application d'engrais azoté. La phase de paramétrage consiste à attribuer aux paramètres définis par SWAT des valeurs caractéristiques du bassin versant à l'étude. Le paramétrage se fait en deux étapes. D'abord, lors de la mise en œuvre du modèle, l'utilisateur est appelé à entrer plus types d'informations dans un système d'information géographique (SIG) qui est couplé au modèle SWAT. Dans un deuxième temps, le modèle utilise les informations entrées dans le modèle par l'utilisateur pour en dériver de nouvelles, nécessaires à son fonctionnement. Les valeurs des paramètres, d'abord initialisées à une valeur par défaut par le modèle, peuvent ensuite être ajustées par l'utilisateur afin de caler le modèle.

Caler le modèle consiste, pour une période donnée, à ajuster les valeurs des paramètres des équations en procédant par itération, afin que les données prédites correspondent le mieux aux données réelles obtenues à partir de mesures sur le terrain.

Dans cette étude, le calage s'est appuyé sur les valeurs (annuelles, mensuelles et quotidiennes) de débit des cours d'eau à l'exutoire des deux bassins Walbridge, ainsi que sur celles des flux en MES, P et N, pour la période allant de novembre 2001 à décembre 2003. Il s'est basé également sur la proportion (annuelle) du ruissellement par rapport à l'écoulement souterrain, telle qu'établie à l'aide des mesures de conductivité électrique entre novembre 2004 et novembre 2006. La

précision du modèle est mesurée par trois indices statistiques reflétant l'écart entre les valeurs réelles et les valeurs prédites. Ces indices sont : le coefficient de corrélation de Pearson (r), le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS; ASCE, 1993) et le pourcentage de déviation des valeurs prédites par rapport aux valeurs mesurées (Dv) (Moriassi et al., 2007).

## 2.1.4.5. Paramétrage du modèle pour les bassins à l'étude

### 2.1.4.5.1. Attributs du paysage

Cette section présente les principales caractéristiques des bassins versants susceptibles d'influencer la simulation de leur fonctionnement hydrologique. Ces paramètres constituent la « situation initiale » sur laquelle s'appuie le calage du modèle.

La délimitation du bassin versant de la rivière aux Brochets et de ses sous-bassins s'est appuyée sur une intégration des données hydrographiques, topographiques, pédologiques et d'utilisation des sols de la portion québécoise du bassin versant de la rivière aux Brochets. Le modèle numérique de terrain (MNT) a été développé à partir de données multisources (Deslandes et al., 2002a et 2002b). Sa résolution spatiale est de 30 m et sa précision de l'ordre de  $\pm 1,3$  m.

La cartographie de la couverture pédologique provient de différentes sources (Thériault et al., 1943; Cann et al., 1948). Les propriétés physico-chimiques des sols, comme la texture, la conductivité hydraulique, la densité apparente et le pourcentage de matière organique ont été extraites de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al., 1990). Les réserves en eau utile ont été calculées à partir des données de granulométrie (USDA-NCRS, 2001), alors que les facteurs d'érodabilité du sol proviennent de Bernard (1996) ou ont été estimés selon la méthode du nomogramme de Wischmeier et al. (1971).

Le groupe hydrologique (A, B, C ou D), caractéristique de la série de sol propre à chaque URH (tableau 66), a été déterminé selon des critères tirés de la méthodologie du USDA (Michaud et al., 2012). Le groupe A comprend les sols les mieux drainés alors que le groupe D correspond à ceux dans lesquels l'infiltration de l'eau est beaucoup plus lente, voire minime.

**Tableau 66. Groupes hydrologiques et caractéristiques des sols.**

	Texture dominante et autres caractéristiques	Taux d'infiltration quand le sol est saturé	Potentiel de ruissellement	Série de sols (bassins Walbridge)
<b>A</b>	Grossière (sables, graviers)	Élevé	Faible	Rougemont
<b>B</b>	Fine à moyennement grossière (limons, sables fins)	Modéré	Modéré	Schefford
<b>C</b>	Fine (limons) Couche imperméable	Faible	Élevé	Milton, Complexe Milton –Shefford, Rubicon
<b>D</b>	Très fine (argile) Nappe haute Couche d'argile à la surface du sol	Très faible	Très élevé	Terre noire

La représentation spatiale de l'utilisation du sol a été réalisée à partir de la classification d'une image Landsat 7 ETM+ du 5 juillet 1999 (Cattaï, 2004). Pour les besoins du modèle, les superficies en cultures annuelles ainsi que celles en prairies et pâturages ont été considérées comme étant drainées, même si aucune donnée relative à la distribution spatiale du drainage souterrain n'était disponible. Cette hypothèse impute le drainage souterrain à environ 60 % du parcellaire en culture, ce qui est représentatif de la région d'étude (Michaud et al., 2004a et

2004b). La profondeur moyenne des drains a été fixée à 900 mm, le temps requis pour atteindre la capacité au champ à 48 heures et la durée du délai d'évacuation au cours d'eau à 18 heures.

#### 2.1.4.5.2. Données météorologiques

Les données météorologiques (précipitations totales et températures minimums et maximums journalières) proviennent de la station Farnham (45°18' N, 72°54' O; 68 m d'altitude). Les données de janvier 2000 à décembre 2003 ont été utilisées pour le calage du modèle alors que celles de janvier 2004 à décembre 2006 ont servi pour la validation.

#### 2.1.4.5.3. Croissance des cultures

La modélisation de la croissance des cultures a pour sa part été ajustée aux unités thermiques de croissance (UTC) requises pour chacune des cultures modélisées. Ces UTC ont été calculées à partir des données de températures de la période à l'étude ainsi qu'à l'aide des dates de semence et de récolte de chacune des cultures (Financière agricole du Québec, 2006). Certains paramètres de croissance des cultures ont ensuite été ajustés par itération, de façon à reproduire les biomasses et les rendements généralement observés dans la région.

#### 2.1.4.5.4. Richesse du sol en P et en N

Les paramètres servant au calcul des processus de minéralisation et de rétroversion du phosphore, modélisés de façon journalière par SWAT à l'échelle de l'URH, ont été initialisés à une concentration du sol en P labile de 31 mg/kg. La spatialisation de la richesse initiale des sols en P a été effectuée à partir de 1 328 dosages de P selon la méthode Mehlich-3 (Mehlich, 1984), redistribués à l'échelle des sous-bassins hydrographiques (Deslandes et al., 2002a et 2002b). Les dosages selon la méthode Mehlich-3 ont été convertis en valeurs équivalentes selon la méthode Olsen (Olsen et al., 1954), en appliquant la courbe de calage de Tran et Giroux (1990). Les estimations de la teneur en P selon la méthode Olsen ont à leur tour été converties en teneurs de P labile selon l'équation proposée par Sharpley et al. (1984). Les teneurs en P organique, en N organique et en nitrate ont pour leur part été initialisées à une valeur par défaut par le modèle.

#### 2.1.4.5.5. Systèmes cultureux et fertilisation du scénario de calage

Des « itinéraires simplifiés de gestion agricole » ont été définis pour chacune des cultures identifiées par la carte d'utilisation du sol établie pour l'année 1999 et comportent une description des modalités (dates, outils, intrants le cas échéant) des travaux cultureux. Pour l'ensemble des cultures annuelles, l'unique scénario de travail du sol retenu comme situation initiale est basé sur la pratique conventionnelle du labour automnal et des hersages printaniers. La fertilisation est ajustée annuellement en fonction du type de culture, du calendrier probable de gestion du parcellaire et des précipitations observées pour la période 2000-2003, tout en tenant compte des apports totaux en N et P.

L'historique de l'état des cultures au Québec (Financière agricole du Québec, 2006) et les données météorologiques ont permis, dans une certaine mesure, de valider les choix des dates des semis et des récoltes. Compte tenu des pratiques généralement observées dans la région, la date la plus hâtive des épandages a été fixée à la première journée, à partir de la dernière semaine d'avril, ayant une période de 48 heures sans précipitation ni avant, ni après. De manière similaire, une période de 48 heures sans précipitation a été fixée comme préalable à

l'enfouissement des engrais ou à l'ensemencement. Ces règles entraînent des délais d'incorporation des fertilisants de 6 à 16 jours. Les itinéraires d'épandages estivaux et automnaux observent la même logique.

Les apports annuels de P et N apportés par la fertilisation minérale et organique par bassin versant ont été dérivés des informations anonymes sur les dépenses annuelles en engrais minéraux, la composition des cheptels et les types de culture, consignés dans la fiche gouvernementale d'enregistrement de l'exploitation agricole (MAPAQ, 2003). Une première distribution spatiale des apports d'engrais de ferme et minéraux a été établie à l'échelle des sous-bassins du bassin versant de la rivière aux Brochets. Les données de gestion des sols et des cultures recensées à l'échelle de la parcelle, acquises dans le cadre de l'étude de trois sous-bassins expérimentaux (Michaud et al., 2004a et 2004b), ont ensuite servi de balise pour la répartition à l'échelle de la culture.

Les apports en engrais de ferme ont été répartis sur trois périodes, soit en pré-semis (45 % des volumes épandus), en post-levée (36 %) et à l'automne (19 %). Cette répartition reflète les déclarations de la fiche d'enregistrement des exploitations agricoles. En ce qui concerne les engrais minéraux, les apports d'azote ont été fractionnés en parts égales entre les périodes de pré-semis et de post-levée et appliqués au semis seulement pour le phosphore.

#### 2.1.4.6. Description des scénarios modélisés

La modélisation de l'influence des différents scénarios de fertilisation a été réalisée sur deux bassins agricoles du ruisseau Walbridge pour la période de 2001 à 2006. L'approche retenue se décline en deux grandes étapes. D'abord caler le modèle puis créer des scénarios (7) de fertilisation qui seront comparés entre eux.

##### 2.1.4.6.1. Scénarios de fertilisation

Sept scénarios, représentatifs des doses de fertilisation azotée appliquées dans le cadre du volet agronomique du projet ReZoTaGe, ont été simulés. Les mêmes périodes, variables climatiques, descripteurs physiographiques et paramètres de calage utilisés pour le scénario de référence ont été maintenus. Toutefois, toutes les superficies en cultures ont été modélisées en maïs drainé souterrainement afin de faciliter la comparaison des résultats issus des différents scénarios de fertilisation. De plus, afin d'assurer la croissance des cultures dans le modèle, la dose maximale de phosphore recommandée dans le guide de fertilisation (CRAAQ, 2003) a été appliqué au maïs. Le tableau 67 offre un sommaire des scénarios de fertilisation retenus pour l'étude.

**Tableau 67. Description des scénarios de fertilisation.**

N0.	Nom du scénario	Description de la fertilisation N	Dose N totale
1	Mais_150_PRE	150 kg/ha au semis	150 kg/ha
2	Mais_100_POST	50 kg/ha au semis + 100 kg/ha en post-levée	150 kg/ha
3	Mais_50_PRE	50 kg/ha au semis	50 kg/ha
4	Mais_50_POST	50 kg/ha au semis + 50 kg/ha en post-levée	100 kg/ha
5	Mais_200_POST	50 kg/ha au semis + 200 kg/ha en post-levée	250 kg/ha
6	Mais_250_PRE	250 kg/ha au semis	250 kg/ha
7	Mais_0	0 kg/ha	0 kg/ha

## 2.1.4.7. Résultats

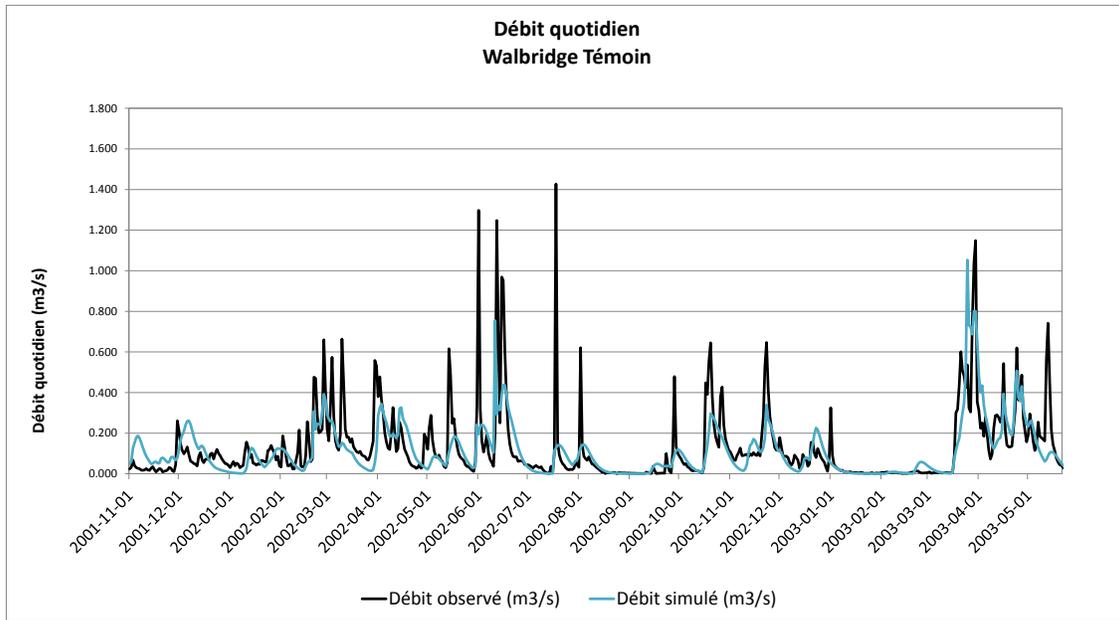
### 2.1.4.7.1. Calage et validation

Le modèle a été calé sur la période allant du 1<sup>er</sup> novembre 2001 au 21 mai 2003 et les résultats ont été validés du 1<sup>er</sup> novembre 2004 au 31 juin 2006. La procédure suivie consiste à caler les débits quotidiens dans un premier temps, puis l'érosion et les exportations mensuelles de nutriments sont ensuite calées.

Les résultats de calage des débits quotidiens, présentés au tableau 68, sont satisfaisants. Les résultats des déviations par rapport aux débits sont très bons et bien en deçà de 10%, tant pour la période de calage que pour la période de validation. Le coefficient de Nash-Sutcliff est satisfaisant pour la période de calage dans le bassin aval mais un peu faible dans le bassin amont. Ceci indique que les pointes de débits journaliers ne sont pas parfaitement simulées, tel qu'illustré à la figure 47. Pour la période de validation, la simulation des débits montrent de très bons résultats en ce qui concerne les volumes d'eau, avec une déviation en-dessous de 10 %. Encore une fois, les coefficients Nash-Sutcliff (NS) ne sont pas satisfaisants. Toutefois, comme le transport de l'azote s'effectue principalement sous forme de nitrates, évacués par les drains agricoles, il est estimé que l'estimation des flux globaux de nitrates ne s'en trouve pas significativement affecté. Ces derniers traduisent en effet l'ajustement des pics de crue, typiquement associés à la contribution du ruissellement de surface. Dans l'ensemble, les charges mensuelles de nitrates mesurées demeurent étroitement corrélées aux débits mensuels mesurés dans les cours d'eau. Les tableaux 69 et 70 rapportent ces observations pour les années 2002, 2005 et 2006, représentatives de conditions de précipitations normale, sèche et humide, respectivement.

**Tableau 68. Résultats de calage et de validation des débits quotidiens des bassins versants Walbridge Intervention (4) et Témoin (5).**

	Période entière		Période de calage		Période de validation	
	1 nov 2001 - 31 oct 2006		1 nov 2001 - 21 mai 2003		1 nov 2004 - 31 juin 2006	
	Bassin 4 Intervention	Bassin 5 Témoin	Bassin 4 Intervention	Bassin 5 Témoin	Bassin 4 Intervention	Bassin 5 Témoin
Coefficient de corrélation	0.60	0.66	0.72	0.78	0.59	0.64
Nash-Sutcliff	0.12	0.35	0.45	0.58	0.21	0.37
Différence (mm)	141.06	218.19	-55.61	7.15	64.01	88.81
Déviations (%)	5.34	9.12	-6.18	-2.95	5.07	7.66



**Figure 47. Débits quotidiens mesuré et simulé du bassin Walbridge Témoin pour la période de calage (novembre 2011 à mai 2003).**

Les résultats mensuels du calage des nitrates (tableau 71) sont également satisfaisants. La déviation de charges de nitrates exportés (kg) est très bonne pour le bassin amont, avec moins de 1 %, et satisfaisante pour le bassin aval (-16,9 %) pour la période de calage. Les coefficients Nash-Sutcliff sont également bons (0,72) à très bons (0,77) et les corrélations sont bonnes (0,91 et 0,88) pour les bassins Témoin et Intervention respectivement. Durant la période de validation, l'inverse est observé, le bassin aval montre une déviation jugée très bonne alors que dans le bassin amont, les exportations de nitrates sont sous-estimées de 28,4 %. Comme précédemment, les coefficients Nash-Sutcliff de la période de validation illustre la difficulté du modèle à reproduire les pics d'exportations mensuels des nitrates durant cette période. Durant la période de calage (figure 48) les charges simulées suivent bien les observations, bien qu'elles soient généralement un peu sous-estimées. Toutefois, durant la période de validation (figure 49), la tendance est moins claire et certains pics sont fortement sous-estimés, comme en mai 2006. Il faut cependant noter que l'année 2006 fut une année particulièrement humide (Environnement Canada, 2013) et que certaines journées du mois de mai ont reçu beaucoup de précipitations (ex. 31 mai : 57,4 mm). Bien que le modèle soit bien calé, il est difficile de l'ajuster à la fois pour la norme et pour les extrêmes. La présence de surestimations et de sous-estimations est donc inévitable, surtout en conditions climatiques extrêmes.

**Tableau 69. Débits et charges de nitrates mensuels mesurés du bassin amont pour les années 2002, 2005 et 2006.**

Intervention	Colonne1	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	Corrélation
2002	Débit mesuré (mm)	29	56	75	60	61	104	28	11	11	55	57	21	
	NO <sub>3</sub> mesuré (kg)	1592	2236	3127	2873	2776	4837	1253	413	448	2443	2676	1101	0.99
2005	Débit mesuré (mm)	56	8	34	134	30	37	11	6	43	147	102	58	
	NO <sub>3</sub> mesuré (kg)	1653	165	737	3642	1217	1808	294	232	2047	8501	5484	1740	0.91
2006	Débit mesuré (mm)	90	44	37	63	118	64	28	19	8	25	--	--	
	NO <sub>3</sub> mesuré (kg)	2677	1276	1202	2008	6926	3072	1164	723	161	955	--	--	0.92

**Tableau 70. Débits et charges de nitrates mensuels mesurés du bassin aval pour les années 2002, 2005 et 2006.**

Témoïn		janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	
2002	Débit mesuré (mm)	24	51	72	52	46	96	28	16	12	56	53	27	
	NO <sub>3</sub> mesuré (kg)	1342	2371	3637	2685	2354	5405	1465	755	572	2938	2747	1535	0.99
2005	Débit mesuré (mm)	6	1	77	118	25	47	16	6	45	121	82	59	
	NO <sub>3</sub> mesuré (kg)	106	5	951	2436	857	2103	400	170	1722	5558	3447	1629	0.85
2006	Débit mesuré (mm)	74	37	43	56	108	68	33	34	8	26	--	--	
	NO <sub>3</sub> mesuré (kg)	1842	826	1130	1473	5330	2789	1186	1300	132	859	--	--	0.93

**Tableau 71. Résultats mensuels de calage (Nov. 2001 à mai 2003) et de validation (Nov. 2004 à oct. 2006) des exportations de nitrates des bassins Walbridge Témoïn et Intervention**

	Intervention (BV 4 – amont)		Témoïn (BV 5 - aval)	
	Calage	Validation	Calage	Validation
<b>Coefficient de corrélation</b>	0,88	0,72	0,91	0,59
<b>Nash-Sutcliff</b>	0,77	0,43	0,72	0,26
<b>Différence (kg)</b>	-146,3	-14470,4	-6562,3	676,3
<b>Déviatiion (%)</b>	-0,4%	-28,4%	-16,4%	1,8%

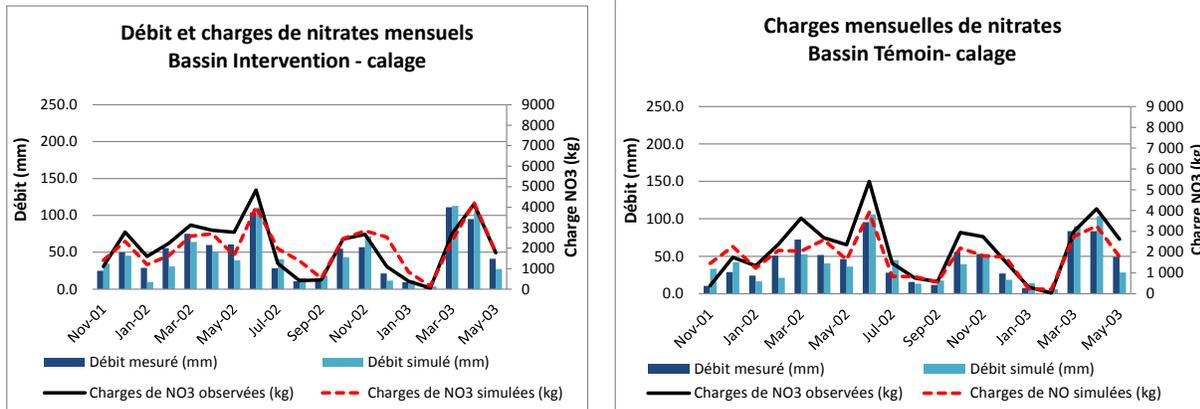


Figure 48. Débit et charges de nitrates mensuels observés et simulés des bassins Intervention et Témoin durant la période de calage.

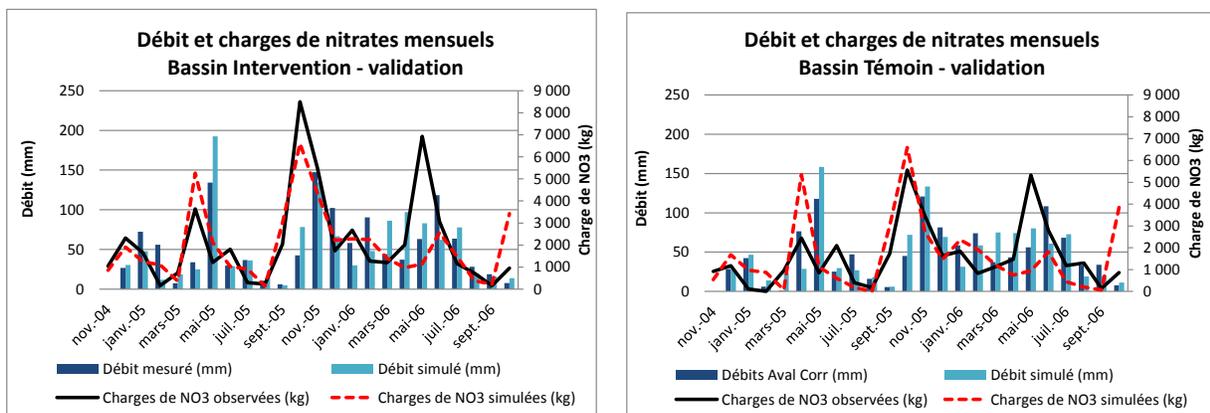


Figure 49. Débit et charges de nitrates mensuels observés et simulés des bassins Intervention et Témoin durant la période de validation.

Tel que mentionné précédemment, les nitrates exportés le sont très majoritairement via les écoulements souterrains, particulièrement par les drains agricoles. Une attention particulière a donc été portée à la séparation du débit du modèle entre ses composantes de ruissellement, écoulement latéral dans les sols et les écoulements aux drains souterrains. Selon les données de Michaud et al. (2009), durant la période de validation, près de 70 % et 74 % des écoulements mesurés dans les ruisseaux Walbridge Intervention et Témoin respectivement seraient des écoulements souterrains. Pour la même période, soit de novembre 2004 à octobre 2006, les écoulements souterrains modélisés par SWAT représentent entre 67 % et 80 % du débit simulé, ce qui concorde bien avec les mesures en cours d'eau. Le calage et la validation du modèle ont donc été jugés suffisamment bons pour maintenir les valeurs des paramètres de calage dans le cadre de la modélisation des différents scénarios de fertilisation.

#### 2.1.4.7.2. Scénarios de fertilisation

Sept scénarios de fertilisation, représentatifs des essais de fertilisation effectués dans le cadre du projet ReZoTaGe, ont été simulés. Les paramètres issus du calage ont été maintenus, à l'exception de certains visant le type de cultures et les modalités d'épandage. Ainsi, dans les sept scénarios, toutes les cultures, incluant les prairies et pâturages, ont été changées en culture de maïs et tous les champs sont

considérés drainés. Seules les périodes et les quantités d'azote appliquées ont été modifiées d'un scénario à l'autre.

Dans le cadre de la modélisation des sept scénarios, les résultats ont été analysés pour la période allant du 1<sup>er</sup> janvier 2001 au 31 décembre 2006. Cependant, une attention particulière a été portée aux années 2005 et 2006 car elles représentent les extrêmes observées de la période modélisée, soit une année sèche et une année humide respectivement. En fait, ce sont particulièrement les mois de mai et juin qui sont déterminants sur les exportations de nitrates. Alors que 2005 n'a reçu que 134 mm de pluie, 2006 en a reçu 356 (Annexe 4), la moyenne 1971-2000 étant d'environ 188 mm (Environnement Canada, 2013).

Le tableau 72 offre une synthèse des simulations de charges de nitrates annuelles (kg) exportées vers les milieux aquatiques des bassins Intervention et Témoin pour 2005 et 2006 pour les sept scénarios. Les pourcentages que représentent les charges de nitrates par rapport aux exportations totales d'azote sont aussi représentés au tableau 72.

**Tableau 72. Charges annuelles simulées (kg/ha) de nitrates exportées des bassins Walbridge Amont et Aval pour les années 2005 et 2006.**

	Dose N (kg/ha)	Approx. 150	150	150	50	100	250	250	0
	No. scénario	Calage	Scen. 1	Scen. 2	Scen. 3	Scen. 4	Scen. 5	Scen. 6	Scen. 7
<b>2005</b>	Amont	35,20 (92%)	34,07 (92%)	21,21 (83%)	17,61 (83%)	18,25 (86%)	70,92 (96%)	68,75 (96%)	13,44 (68%)
		Incomplet	64,62 (96%)	37,36 (95%)	29,58 (92%)	31,95 (93%)	94,65 (97%)	122,64 (98%)	14,63 (78%)
<b>2006</b>	Aval	34,11 (93%)	30,76 (86%)	20,22 (80%)	16,14 (72%)	17,17 (77%)	69,27 (92%)	68,26 (93%)	12,00 (53%)
		Incomplet	50,14 (91%)	32,11 (86%)	24,47 (80%)	26,27 (84%)	81,22 (93%)	99,57 (95%)	13,95 (59%)

**NO. Nom du scénario**

Entre parenthèses : Pourcentage de la charge totale d'azote sous forme de nitrates

- 1 Mais\_150\_PRE 150 kg/ha au semis
- 2 Mais\_100\_POST 50 kg/ha au semis + 100 kg/ha en post-levée
- 3 Mais\_50\_PRE 50 kg/ha au semis
- 4 Mais\_50\_POST 50 kg/ha au semis + 50 kg/ha en post-levée
- 5 Mais\_200\_POST 50 kg/ha au semis + 200 kg/ha en post-levée
- 6 Mais\_250\_PRE 250 kg/ha au semis
- 7 Mais\_0 0 kg/ha 0 kg/ha

Les résultats de modélisation illustrent bien le lien étroit entre l'hydrologie, les caractéristiques physiographiques du territoire, les modalités de la fertilisation azotée et les charges de nitrates exportées. Le tableau 72 démontre que plus les doses d'azote sont élevées, plus les risques de pertes de nitrates sont élevés. Alors que le scénario sans fertilisation simule des pertes de nitrates allant de 9 à 11 tonnes par an, les scénarios 50, 150 et 250 en prédisent jusqu'à 69,6 t, soit près huit fois plus. Tel qu'attendu, le modèle souligne également le risque accru lié aux fertilisations printanières. Par exemple, malgré un apport total identique, les scénarios 1 et 6 (150 et 250 kg/ha au printemps) montrent des charges plus élevées que les scénarios 2 et 5 (150 et 250 kg/ha) pour lesquels la majorité de la dose est appliquée en post levée alors que les besoins des plantes en nutriments sont plus grands. Pour le taux d'apport de 150 kg N/ha, les pertes d'azote prédites sont de 52 à 73 % plus élevées lorsque l'azote est appliqué en pré-semis plutôt qu'en post-levée. Ces résultats soulignent la pertinence des apports d'azote en post-levée, pendant la saison de croissance des plantes, afin de limiter les pertes de nitrates dans le cours d'eau.

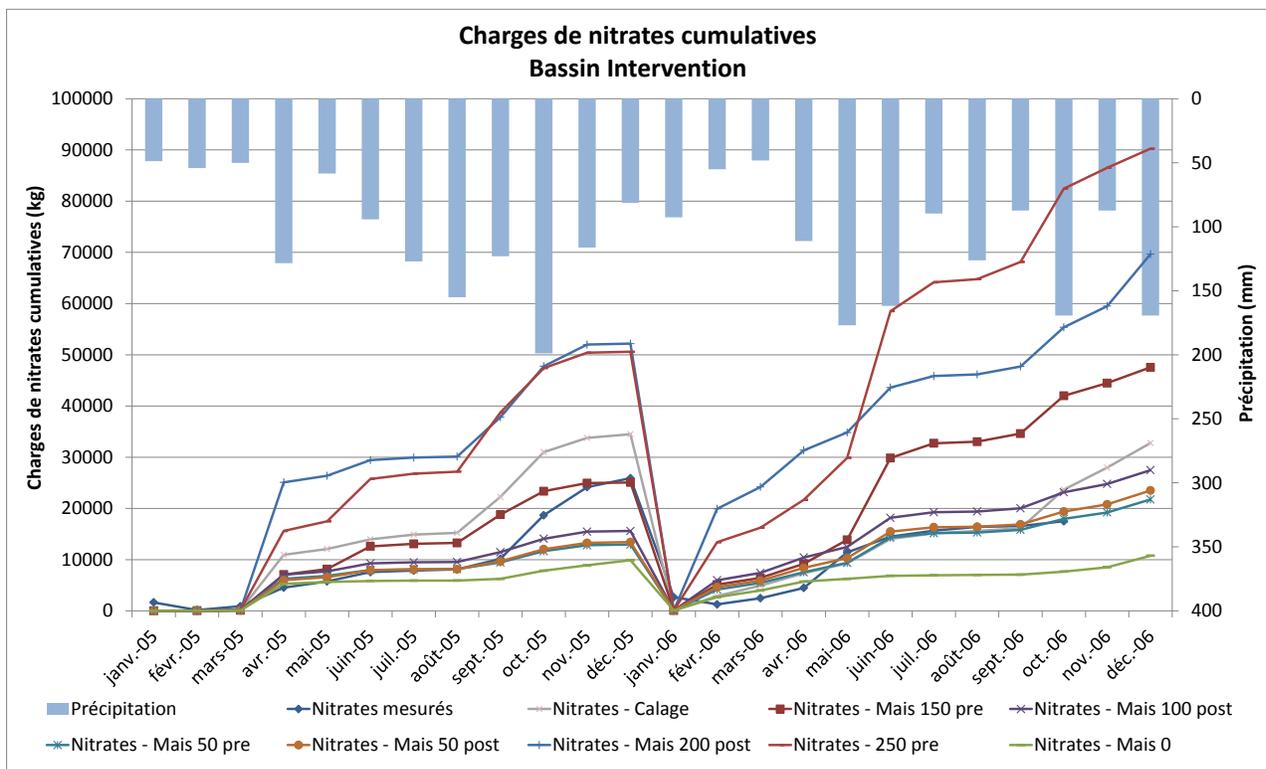


Figure 50. Exportations des charges de nitrates mensuelles du bassin amont en 2005 et 2006.

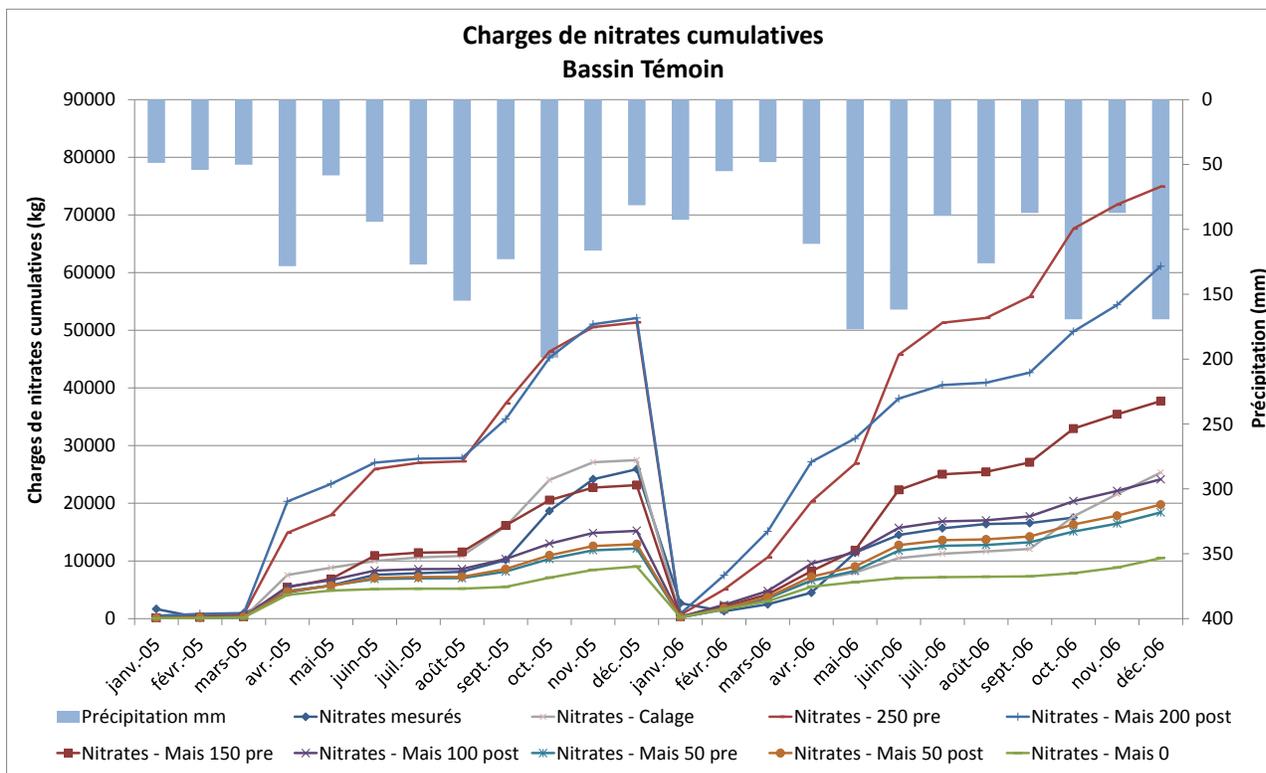


Figure 51. Exportations des charges de nitrates mensuelles du bassin aval en 2005 et 2006.

En ce qui a trait aux effets des doses d'apports, les simulations de flux de N annuels prédisent des taux d'exportation qui passent du simple au double lorsque le taux d'application de N en post-levée passe de 100 à 200 unités d'azote (scénarios 2 vs 5). Cette prédiction est cohérente avec les observations colligées dans le cadre du volet agronomique du projet ReZoTaGe, où un taux de sur-fertilisation de 100 kg N/ha ( $\Delta N_{op} = 100$ ) en post-levée est associé à un stock de nitrates résiduels (NRS) moyen de l'ordre de 80 kg N/ha en fin de saison, suivant des proportions semblables à celle rapportées par Giroux et al. (2009). Les figures 50 et 51 illustrent bien la progression des exportations annuelles de nitrates découlant des différents scénarios de sur-fertilisation et de leur période d'apport.

Les résultats de tous les scénarios rapportés au tableau 72 montrent des charges plus élevées en 2006, caractérisé par un mois de juin excessivement pluvieux (162 mm vs 96 mm en moyenne), qu'en 2005, année particulièrement sèche. Cette tendance est aussi très visible sur les figures 50 et 51 où, pour tous les scénarios, les exportations annuelles de nitrates sont plus élevées en 2006 qu'en 2005. Fait à remarquer également, en année relativement plus humide, les pertes de nitrates représentent une plus grande partie des pertes d'azote total (tableau 72). Bien qu'on ne puisse contrôler les précipitations, ces résultats soulignent l'importance du rôle des précipitations et de l'hydrologie dans les exportations de nitrates des champs vers les cours d'eau. De plus, comme les pertes de nitrates sont liées principalement aux transferts souterrains vers les drains, ces résultats incitent à un contrôle des eaux de drainage et de la nappe. Ces systèmes commencent d'ailleurs à être implantés au Minnesota<sup>4</sup> où les eaux des systèmes de drainage souterrain agricoles ont été identifiées comme principale de la contamination des cours d'eau et des lacs par les nitrates.

La figure 52 illustre la distribution dans le temps des pertes simulées d'azote d'une zone de champ donnée, représentatives d'une culture de maïs sur un sol de série Shefford (loam graveleux), bien drainé, en 2003 et 2004. La figure met nettement en relief le lien entre les périodes de forts écoulements souterrains et les pics dans les charges de nitrates. Le tableau 73 permet pour sa part de comparer l'effet de la classe de drainage du sol sur la répartition des écoulements souterrains et de surface, de même que sur les charges de nitrates de deux unités de réponse hydrologique (URH). Afin de faciliter la comparaison entre URH, les informations sont tirées du même scénario (No. 1) où 150 kg/ha d'azote sont appliqués en pré-semis. Le sol mieux drainé (Shefford) génère à chaque année plus d'écoulements souterrains et conséquemment des flux de nitrates relativement plus élevés que le sol mal drainé (Milton). Les proportions prédites des nitrates exportées par écoulement souterrain pour les deux types de sol sont néanmoins semblables et cohérentes avec les observations colligées en parcelles par l'équipe de l'Université McGill dans le bassin versant de la rivière aux Brochets<sup>5</sup>, qui attribuaient 97 % à 99% des charges de nitrates totales exportées aux drains souterrains.

À l'échelle des deux bassins versants à l'étude, un constat similaire est déduit des prédictions de flux de nitrates. Le bassin amont, dominé par des sols de groupes hydrologiques B ou C (USDA, 2007), est associé à des prédictions d'écoulements souterrains et de flux de nitrates plus élevées (tableau 73 et figures 50 et 51) que pour les sols moins perméables du bassin aval classés C ou D (tableau 65). Le classement des sols en groupes hydrologiques, développé comme indicateur de vulnérabilité au risque lié au ruissellement de surface, traduit ainsi à l'inverse, le risque lié aux pertes de nitrates.

---

<sup>4</sup> Agweek, [http://www.agweek.com/event/article/id/22460/publisher\\_ID/80/](http://www.agweek.com/event/article/id/22460/publisher_ID/80/)

<sup>5</sup> Peter Enright, Université McGill, communication personnelle sur les données des parcelles Marchand et Gagnon

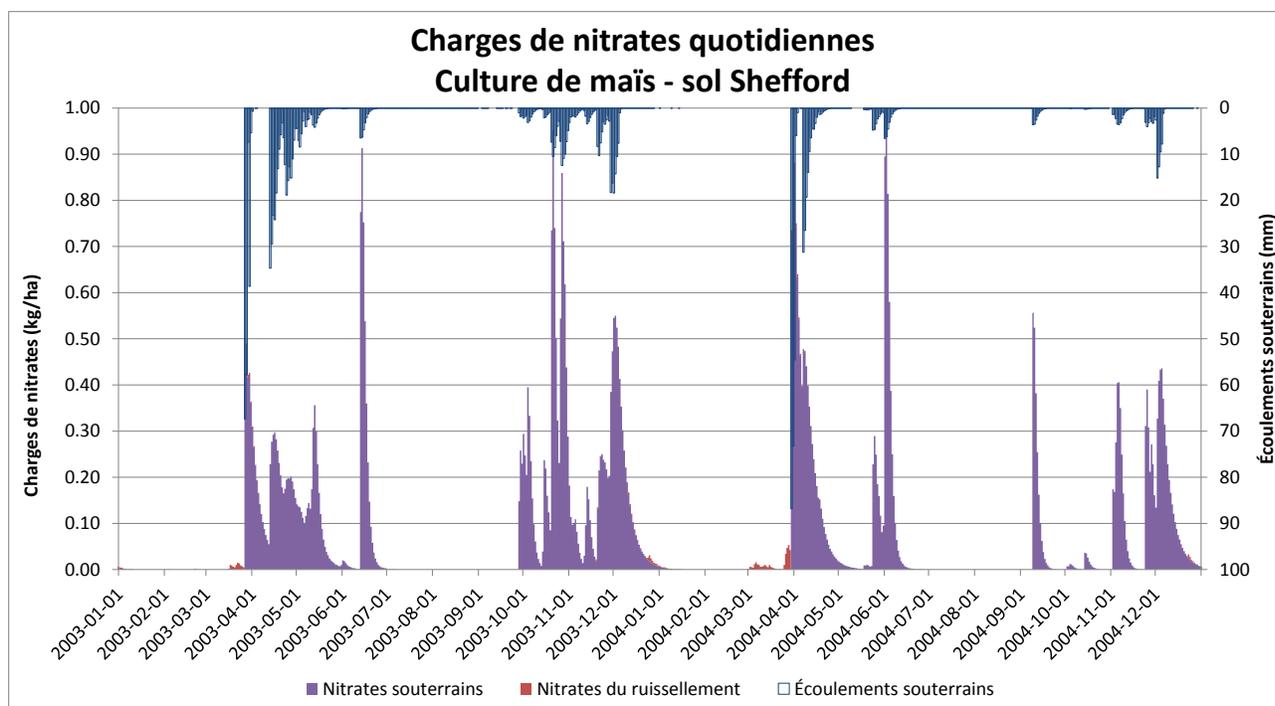


Figure 52. Provenance des charges de nitrates quotidiennes d'une URH représentant une culture de maïs sur un sol bien drainé (Shefford loam graveleux) en 2003 et 2004 (hauteurs de précipitations dans les normales).

Tableau 73. Comparaison des hauteurs d'eau et des charges de nitrates d'une URH en culture de maïs sur un sol bien drainé (Shefford loam graveleux) et une URH en culture de maïs sur un sol mal drainé (Milton loam sableux).

HRU	Année	Débit (mm)	Écoulement souterrain (mm)	Nitrates du ruissellement (kg/ha)	Nitrates souterrains (kg/ha)	Nitrates total (kg/ha)
Maïs - Shefford bien drainé	2003	903,34	809,47	0,21	34,99 (99%)	35,20
	2004	670,84	505,86	0,44	26,53 (98%)	26,97
	2005	879,92	754,73	0,30	43,23 (99%)	43,53
	2006	1135,55	1037,94	0,20	87,18 (99%)	87,38
Maïs - Milton mal drainé	2003	778,36	583,63	0,48	26,77 (98%)	27,25
	2004	568,14	352,30	0,56	20,09 (97%)	20,65
	2005	750,27	528,29	0,54	38,06 (98%)	38,60
	2006	919,83	702,45	0,52	68,48 (99%)	69,00

En conclusion, le modèle SWAT, calé et validé sur la base du suivi hydrologique des bassins versants Walbridge Amont et Aval entre 2001 et 2006, 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 deux bassins à l'étude. Profitant d'un modèle bien calé et validé, les résultats des sept scénarios de fertilisation azotée du maïs à l'étude mettent en évidence l'influence de la période (pré-semis vs post-levée) et des taux d'apports de N sur les exportations de nitrates à l'exutoire des ruisseaux. Le passage d'une fertilisation azotée en pré-semis à des apports fractionnée en post-levée diminue les pertes 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 prédites de nitrates. Les résultats des simulations indiquent en effet une grande sensibilité du modèle aux apports de

N qui dépassent les besoins des cultures. Une augmentation des apports en post-levée de 100 kg N/ha au-dessus de la balise agronomique (150 N) double ainsi les prédictions d'exportation de nitrates vers le ruisseau. Ces prédictions sont cohérentes avec les nitrates résiduels du sol (NRS) mesurés en fin de saison dans le cadre du volet agronomique du projet, qui associe un de sur-fertilisation de l'ordre de 100 kg N/ha à un stock de NRS moyen de 80 kg N/ha.

En marge des prédictions des pertes d'azote dans l'environnement, les résultats du volet hydrologique du projet ReZoTaGe incitent à la mise à contribution des études à portée hydrologique dans le développement des outils de recommandation de la fertilisation azotée des cultures. Les concentrations en nitrates résiduels observées en 2012 et 2013 dans le cadre du volet agronomique de ce projet témoignent de l'influence des conditions hydrologiques sur le devenir du N, telle que décrite dans le cadre du volet hydrologique du projet. Alors, que le modèle hydrologique arrive à prédire adéquatement les flux de nitrates à l'exutoire du ruisseau, encore faut-il s'assurer que les routines terrestres du cycle de l'azote soient bien décrites. Dans la perspective d'études futures ciblées sur la formulation des recommandations de fertilisation azotée, il y a donc intérêt à coupler les observations de la transformation du stock d'azote dans le sol avec celles de sa mobilité vers le cours d'eau.

## Références citées

- Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah et J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. American Water Resources Association*, 34(1) : 73-89.
- Arnold, J.G. et N. Fohrer. 2005. SWAT2000 : current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19 : 563-572.
- ASCE (American society of civil engineering). 1993. Task Committee on definition of criteria for evaluation of watershed models of the watershed management Committee, Irrigation and Drainage Division. Criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(3) : 429-442.
- Bernard, C. 1996. Estimation de l'érodabilité des principales séries de sol du Québec, à l'aide du nomographe de Wischmeier. *Agrosol*, 9(2) : 6-12.
- Cann, D.B., P. Lajoie et P.C. Stobbe. 1948. Étude des sols des comtés de Shefford, Brome et Missisquoi dans la province de Québec. # 3M-10358-12-47. Service des fermes expérimentales, ministère fédéral de l'Agriculture, en collaboration avec le ministère de l'Agriculture du Québec et le Collège Macdonald, Université McGill. 94 p.
- Castle, Emery N., Becker, M.H., Nelson, A.G. *Farm Business Management – The Decision-Making Process*. Macmillan Publishing Company. 1987. 413 pages.
- Cattaï, J. 2004. La détection de contours dans l'approche stratifiée par champ pour la classification d'un milieu agricole à l'aide de données Landsat TM. Cas du bassin versant de la rivière aux Brochets, sud du Québec. Mémoire de maîtrise de l'Université de Sherbrooke, Département de géographie et télédétection, Faculté des lettres et sciences humaines. 120 p.
- Centre d'étude sur les coûts de production en agriculture (CECPA). 2011. Étude sur les coûts de production des céréales, du maïs-grain et des oléagineux en 2009 au Québec. Lévis. 112 p.
- CRAAQ, 2003. Guide de référence en fertilisation (1<sup>re</sup> édition). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 294 p.
- CRAAQ, 2010. Guide de référence en fertilisation (2e édition). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Québec. 473 p.
- Deslandes, J., A. Michaud et F. Bonn. 2002a. Use of GIS and remote sensing to develop indicators of phosphorus non-point source pollution in the Pike River basin. Dans : *Lake Champlain: Partnerships and Research in the New Millennium*. T.O. Manley, P.L. Manley and T.B. Mihuc (eds.), Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, NY, United States, pp 271-290.
- Deslandes, J., A. Michaud et F. Bonn. 2002b. Développement et validation des indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore dans le bassin versant de la rivière aux Brochets, *Agrosol*, 13 (2) : 111-123.
- Deslandes, J., I. Beaudin, A. Michaud, F. Bonn et C. A. Madramootoo. 2007. Influence of landscape and cropping system on phosphorus mobility within the Pike River watershed of Southwestern Quebec. Model parametrization and validation. *Revue canadienne des ressources hydriques*, 32(1): 21-42.
- Environnement Canada. 2013. Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1971 à 2000. Farnham. Site Internet consulté en ligne en janvier 2014 : [http://climat.meteo.gc.ca/climate\\_normals/results\\_f.html?stnID=5358&autofwd=1](http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_f.html?stnID=5358&autofwd=1)
- Di Luzio, M. R. Srinivansan, J. G. Arnold et S.L. Neitsch. 2002. Arcview interface for SWAT2000 User's guide. Texas Agricultural Experiment Station and USDA Agricultural Research Service, BCR Report 02-07. 345 p.
- Financière agricole du Québec. 2006. L'état des cultures. Document consulté en ligne en 2006 à l'adresse suivante: <http://www.financiereagricole.qc.ca/index.php?id=990>.
- Giroux, M. et M. Lemieux. 2006. Influence des modes de fertilisation sur les pertes d'éléments nutritifs dans les drains agricoles sous le maïs grain, l'orge et le canola. *Cahiers de l'observatoire des sols*. No. 6. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. 84 pages.
- Giroux, M., A. N'Dayegamiye et M. Lemieux. 2008. Effets des historiques d'épandage des engrais minéraux et organiques et des rotations de culture sur les rendements, les besoins en engrais N du maïs grain et de la fertilité azotée des sols. *Cahiers de l'observatoire des sols*. No. 7. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. 39 pages.

- 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. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. 37 pages.
- Gombault, Colline. 2012. Modelling Water Quality of the Pike River Watershed under four Climate Change Scenarios. Mémoire de Maîtrise de l'Université McGill. Octobre 2012. 170p.
- Jones, C.A., C.V. Cole, A.N. Sharpley et J.R. Williams. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model. I. Documentation. Soil Sci. Soc. Am. J., 48 : 800-805.
- MAPAQ (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec). 2003. Fiche d'enregistrement des exploitations agricoles, Québec.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2. Communications of Soil Science and Plant Analysis, 15 : 1409-1416.
- Michaud, A. R., I. Landry, C. Desmarais et C. Savoie. (2003) Structures et relations spatiales entre les images aériennes multi-spectrales, les propriétés du sol et les rendements de grandes cultures. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 29, n° 1, p. 66-74.
- Michaud, A.R. et M.R. Laverdière. 2004b. Cropping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability. Can. J. Soil Science, 84(3) : 295-305.
- Michaud, A.R., M.R. Laverdière et R. Lauzier. 2004a. Temporal and spatial variability in non-point source phosphorus in relation to agricultural production and terrestrial indicators: the Beaver brook case study, Pike river basin, Quebec. Dans : T.O. Manley, P.L. Manley and T.B. Mihuc, (ed.), Lake Champlain: Partnerships and research in the new millennium. Kluwer Academic/Plenum pub. New York NY. pp 97-121.
- Michaud, A.R., J. Deslandes et J. Desjardins. 2004c. 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 à son partenaire financier le Gouvernement du Québec (Projet no. 212). IRDA, Québec, 100 p. Document abrégé disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Rapport%20final.pdf>
- Michaud, A. R., J. Deslandes et I. Beaudin. 2006. Modélisation de l'hydrologie et des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin versant de la rivière aux Brochets à l'aide du modèle SWAT. Rapport final. Québec, 108 p.
- Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C. A. Madramootoo. 2007. SWAT-predicted influence of different landscape and cropping systems alterations on phosphorus mobility within the Pike River watershed of South-western Quebec. 2007. Canadian journal of soil science, 87(3): 329-344.
- Michaud, A., S. Seydoux, I. Beaudin et C. Gombault. 2008. Combinaisons de pratiques de gestion bénéfiques et qualité de l'eau : Étude par modélisation hydrologique de deux bassins versants en Montérégie (Québec). Rapport final présenté à Environnement Canada. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA). 87 p. et annexes.
- Michaud, A.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Québec, Québec, 155 p.
- Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012a. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport sommaire pour la période de référence 2009-2011. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Québec, Canada. 87 pages et annexes.
- Michaud, A.R., A. Drouin, A. Mailhot, G. Talbot, D. Huard, S. Biner, R. Lagacé, N-R. Rocha et G. Gagné. 2012b. Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques. Projet réalisé dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec et en collaboration avec Ressources naturelles Canada. Consortium de recherche OURANOS. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada. 168 pages et annexes.
- 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. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. 28 pages.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. William et K.W. King. 2002a. Soil and water assessment tool - theoretical documentation. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas, 525 p.

- Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe et L.A. Dean. 1954. Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. USDA Circular 939. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Pearce, A, M. Watzin, G. Druschel, L. Stevens et D. Rizzo. 2010. Exploring contributing factors to cyanotoxin production in Missisquoi Bay, Lake Champlain using a modified self-organizing map. Lake Champlain 2010: Our Lake, Our Future. Dudley H. Davis Center, University of Vermont.
- Santhi, C., J.G. Arnold, J.R. Williams, W.A. Dugas, R. Srinivasan et L. M. Hauck. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. AWRA No. 00044, 37(5) : 1169-1188.
- Sharpely, A.N., C.A. Jones, C. Gray et C.V. Cole. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model: II prediction of labile, organic and sorbed phosphorus. Soil Science Society of America Journal, 48 : 805-809.
- Sylvain J.-D. 2011. Développement et validation d'indices spectraux pour la cartographie des propriétés physiques des sols : une approche multitemporelle appliquée dans le bassin versant du ruisseau Ewing (Qc). Mémoire Maîtrise, Direction G. Bénié et A.R. Michaud. Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et des sciences humaines, Université de Sherbrooke.
- Sylvain, J-D, A.R. Michaud, M.C. Nolin et G.B. Bénié. 2012. A novel spectro-temporal approach for predicting soil physical properties. Digital Soil Assessments and Beyond. Minasy, Malone et McBratney (eds) Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62155-7. Pp. 381-386.
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec – Région agricole 6, Richelieu, Saint-Hyacinthe. Gouvernement du Québec, publication no. 91-0025, Québec, Canada. 199 p.
- Thériault, J.-E., L. Choinière, E. Pageau et H. Talbot. 1943. Carte des sols du comté d'Iberville. Service de la grande culture du ministère de l'Agriculture et Service de la cartographie économique du ministère de l'Industrie et du Commerce, Québec, QC, Canada.
- Tran, T.S. et M. Giroux. 1990. Relation entre les propriétés du sol et la disponibilité du phosphore à la plante. Agrosol, (3)1 : 7-12.
- Tran, T.S. 1994. Efficacité et devenir de l'engrais marqué (N15) appliqué à la culture de maïs (Zea may L.). Thèse de doctorat. FSA, Université Laval, Québec. 132 pages.
- USDA-NCRS (United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service). 2001. National Soil Survey Handbook, title 430-VI. Document consulté en ligne en 2003 à l'adresse suivante: <http://www.statlab.iastate.edu/soils/nssh/>
- USDA-NRCS. 2007. Hydrologic Soil Group. Dans : National Engineering Handbook, title 210-VI-NEH. Part 630, chapter 7. Disponible à l'adresse : <http://directives.sc.egov.usda.gov/>
- USDA-SCS (United States Department of Agriculture-Soil Conservation Service). 1972. National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, Chapters 4-10.
- Wall, G.J., D.R. Coote, E.A. Pringle et I.J. Shelton (editors). 2002. RUSLE-CAN - Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada: Manuel pour l'évaluation des pertes de sols causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, No de contribution 02-91, 117 pp.
- Williams, J.R. 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources: Proceedings of the sediment-yield workshop, USDA Sedimentation Lab., Oxford, MS, November 28-30, 1972. ARS-S\_40. pp 244-252.
- Wischmeier W.H., C.B. Jonhson et B.V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation, 26(5) : 189-192.

## 2.2. Diffusion des résultats

Le tableau « Diffusion des résultats » présenté ci-après décrit l'ensemble des activités de communication réalisées dans le cadre du projet ReZoTaGe. Le projet a fait l'objet d'activités de communications régulières en continu au sein du réseau de collaborateurs au projet, notamment au moyen d'un bulletin électronique de liaison « Le Rézo ». Les principaux développements du volet géomatique ont profité de présentations à l'occasion de forums scientifiques régionaux et internationaux (Pedometrics, EGU). Enfin, une présentation ciblée principalement sur le volet agronomique du projet a été offerte à l'occasion la journée Grandes cultures du CRAAQ 2014.

## DIFFUSION DES RÉSULTATS

<i>Activités prévues de l'ANNEXE A</i>	<i>Activités réalisées</i>	<i>Description (thème, titre, endroit, etc.)</i>	<i>Date de réalisation</i>	<i>Nombre de pers. rejointes</i>	<i>Visibilité accordée au PCAA (logo, mention)</i>
Une participation à un colloque international (Pedometrics),	Présentation au Colloque Pedometrics en Australie (DSM – Digital Soil Mapping)	A novel spectro-temporal approach for predicting soil physical properties – Présentation orale à Sydney en Australie	13 avril 2012	140 personnes environ	Mention et logo
Une participation à un colloque international (EGU2013)	Présentation à l'assemblée générale annuelle 2013 de l'Union européenne des géosciences (EGU)	Using Multispectral and Elevation Data to Predict Soil Properties for a Better Management of Fertilizers	10 avril 2013	100 personnes environ	Mention et logo
Présentations dans le cadre de colloques scientifiques provinciaux (AQSSS, colloques CRAAQ : sols, géomatique)	Présentation à la journée Innovation en géomatique du centre topographique de Sherbrooke (RNCAN)	La microtopographie et les images multispectrales au service de l'Agroenvironnement – Présentation orale à Sherbrooke (Qc)	3 mai 2012	40 environ	Mention et logo
Présentations dans le cadre de colloques scientifiques	Poster au congrès annuel de l'Association québécoise de télédétection (AQT) 2013	La prédiction des propriétés des sols au moyen de l'imagerie multispectrale : pour une meilleure gestion	25-26-27 sept. 2013	50 personnes environ	Logo et Mention

<b>Activités prévues de l'ANNEXE A</b>	<b>Activités réalisées</b>	<b>Description (thème, titre, endroit, etc.)</b>	<b>Date de réalisation</b>	<b>Nombre de pers. rejointes</b>	<b>Visibilité accordée au PCAA (logo, mention)</b>
provinciaux (AQSSS, colloques CRAAQ : sols, géomatique)		des fertilisants dans les champs			
Présentations dans le cadre de colloques scientifiques provinciaux (AQSSS, colloques CRAAQ : sols, géomatique)	Présentation d'une conférence à l'occasion de la journée d'information sur les grandes cultures du CRAAQ	La télédétection en appui à la gestion localisée des champs : perspectives du projet ReZoTaGe	20 février 2014	Environ 300 (à venir)	Logo et Mention
Présentations régionales, colloques régionaux et assemblées annuelles de clubs conseils	Présentation du projet aux intervenants d'un secteur d'étude particulier : la Baie Lavallière	ReZoTaGe : réalisation de zones technico-économique de gestion	13 déc. 2011	30 environ	Mention et logo
Bulletins d'information pour les partenaires	Rédaction de bulletins (Le Rézo) de quelques pages sur l'avancée du projet	Le Rézo	21 nov. 011, 18 janv. 2012, 21 mars 2012 11 mai 2012 12 avril 2013 24 octobre 2013	50 environ	

<b>Activités prévues de l'ANNEXE A</b>	<b>Activités réalisées</b>	<b>Description (thème, titre, endroit, etc.)</b>	<b>Date de réalisation</b>	<b>Nombre de pers. rejointes</b>	<b>Visibilité accordée au PCAA (logo, mention)</b>
Journée de champ : Présentation des cartographies des sols, description des propriétés et profils de sol, diagnostics de propriétés physiques, Visites des champs (maïs) expérimentaux, Démonstration d'outils à référence spatiale et « Nitracheck »,	Rencontre avec les conseillers agricoles des clubs en agroenvironnement afin de leur présenter les résultats des cartographies des sols et des courbes de réponses à l'azote et d'obtenir leurs commentaires sur résultats	Rencontre de discussion au bureau de la Financière agricole à Saint-Hyacinthe	2 décembre 2013	10	Mention
Publication d'une thèse de Maîtrise et d'un article dans une revue scientifique internationale	Il n'y aura pas de publication de thèse compte tenu du désistement de l'étudiante, mais un article scientifique sera produit en 2014,				
Diffusion des résultats du projet sur Agri-Réseau et site WEB IRDA	Les courbes de réponse à l'azote et les cartographies des champs et des régions ont été transmises aux conseillers agricoles, lesquels les ont transmis aux agriculteurs cultivant les champs				

### **3. CONCLUSIONS**

---

Dans l'ensemble, les résultats du projet ReZoTaGe démontrent que l'approche de gestion localisée du parcellaire, appuyée par la reconnaissance de la variabilité des propriétés des sols à l'échelle des champs, permet de mieux cerner les besoins en fertilisation azotée et ainsi de concilier des gains en termes de rendement économique du maïs grain, avec une atténuation des reliquats d'azote dans le sol en fin de saison et des pertes vers le cours d'eau. Cette conclusion générale s'appuie sur les résultats des quatre volets interdépendants du projet. Le volet télédétection a démontré la faisabilité de représenter la variabilité spatiale intra-parcellaire des propriétés du sol en ayant recours à des images satellitaires, des modèles numériques de terrain et des banques de données géoréférencées de profils de sol. Les volets agronomique et économique du projet ont démontré que la gestion de cette variabilité était pertinente et justifiée au plan de la gestion de la fertilisation azotée du maïs. Enfin, le volet hydrologique du projet a permis de projeter les effets de la modulation des apports d'azote dans les champs en termes de réductions des exportations de nitrates vers le cours d'eau. Les retombées, recommandations et suites possibles à chacun des volets sont successivement présentées ci-après.

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

Le volet géomatique du projet ciblait la validation et l'application à large échelle de la méthode de reconnaissance des propriétés du sol développée par Sylvain et al. (2011) sur un petit bassin versant expérimental de la Montérégie. Cette méthode originale s'appuyait sur la mise en relation d'indices topographiques et d'indices spectraux dérivées d'images satellitaires avec les propriétés des sols colligées lors de campagnes de terrain. La réalisation du projet ReZoTaGe a soutenu l'application de cette méthode à trois autres régions d'étude, beaucoup plus étendues en superficie et présentant des différences marquées dans leurs types de sol. À l'échelle des trois bassins versants ciblés par l'étude, les résultats de prédiction des propriétés texturales et des classes de drainage se sont avérés aussi satisfaisants que dans l'étude originale de Sylvain. Ils permettent ainsi de conclure au caractère transférable de la méthode à l'ensemble du territoire agricole disposant de données géospatiales similaires.

Les routines informatiques et statistiques développées dans le cadre du volet géomatique du projet ReZoTaGe facilitent par ailleurs l'application et la dissémination de la méthode de prédiction des propriétés du sol. Celles-ci permettent dorénavant d'optimiser et d'automatiser la partie la plus laborieuse de la méthode, à l'origine réalisée manuellement, qui consiste à identifier les combinaisons d'indices qui offrent le meilleur pouvoir explicatif des propriétés du sol. La mise en forme conviviale de l'outil, en format de logiciel libre, contribuent aussi à la transférabilité de l'outil auprès d'autres développeurs et utilisateurs de données géospatiales.

Bien que les résultats du volet géomatique du projet soient prometteurs, plusieurs améliorations de l'outil peuvent encore contribuer au succès des prédictions de propriétés et à une plus grande couverture du territoire cartographié. D'une part, il n'y a pas de limites à l'inclusion de nouveaux indices spectraux ou topographiques dans l'application de la méthode. L'outil développé est robuste et adapté à des sources de données d'origines diverses. Dans le cadre de ce projet, les images Landsat ont été privilégiées en raison de leur gratuité. La multiplication des capteurs satellitaires à haute résolution au cours des deux dernières décennies offrent autant d'opportunités de mieux discriminer les propriétés des sols par la télédétection.

Le code informatique supportant les calculs de prédiction des propriétés des sols à partir des différents indices peut également être bonifié. L'automatisation des traitements initiaux des images satellitaires pourrait bénéficier d'un tel investissement. Un autre développement pourrait cibler l'adaptation de la méthode à la présence de couverture végétale, alors que l'approche actuelle s'est limitée aux sols nus en condition printanière. De plus larges territoires, où les cultures de fourrages pérennes sont plus répandues, pourraient alors bénéficier de l'application de la méthode. Le développement du code informatique de facture libre réalisé dans le cadre du

présent projet, supportant l'automatisation des procédures itératives de calculs, pave définitivement la voie à la coopération dans le développement et l'optimisation des outils géospatiaux dans la gestion sur mesure du parcellaire agricole.

Dans une perspective d'application à l'échelle de la ferme, les résultats obtenus dans les trois régions à l'étude, couvrant quelques centaines de kilomètres carrés, justifient l'utilisation de cette cartographie des propriétés des sols en appui au processus décisionnel de gestion localisée du parcellaire. Les cartes de propriétés du sol développées ne se substituent évidemment pas à l'exercice du jugement professionnel du conseiller agricole. Elles complètent plutôt le coffre à outils du conseiller et du producteur, afin d'appréhender la variabilité dans les propriétés du sol, en amont d'autres démarches diagnostiques, telles que l'échantillonnage des sols ou la description de profils de sol. L'indication sur les cartes de propriétés des sols d'une forte probabilité de propriétés distinctes à l'intérieur d'un même champ devrait guider le producteur et son conseiller dans la délimitation de zones de gestion intra-parcellaire. Celles-ci devraient alors profiter d'un échantillonnage composite par zone, permettant d'une part de valider le contraste dans les propriétés du sol et d'autre part de valider la pertinence de la modulation de la régie entre les zones en fonction des propriétés qui leur sont propres.

#### Évaluer la pertinence de la gestion localisée

Reflétant les préoccupations des trois équipes de services-conseils partenaires au projet, l'évaluation technico-économique de la gestion localisée s'est centrée sur le thème de la fertilisation azotée du maïs. Le volet agronomique du projet a soutenu l'évaluation et l'interprétation de la réponse à l'azote du maïs grain dans un réseau d'essais à la ferme déployé sur dans trois bassins versants de la Montérégie. Les données colligées sur les 670 micro-parcelles réparties en 58 zones d'étude démontrent que la prise en compte de la variabilité des propriétés du sol, à l'échelle intra-parcellaire permet d'optimiser le rendement économique de la culture de maïs, tout en réduisant le risque de sur-fertilisation et les pertes d'azote dans l'environnement.

Dans l'ensemble, les résultats colligés aux cours des deux saisons de croissance indiquent que des réductions dans les apports de N sont motivées pour plus de la moitié des champs à l'étude (55 %). La dose optimale moyenne de N en post-levée pour ces 16 champs se situe à 84 kg N/ha, équivalent à une réduction moyenne de 66 unités N par rapport au scénario de référence (150 N). Pour la grande majorité de ces 16 champs, la modulation inter-zone des apports de N est justifiée (13 champs/16; 81 %). La moyenne des doses optimales par zone de sol est de 84 kg N/ha, équivalent à une réduction moyenne de l'ordre de 62 kg N/ha par rapport au scénario de référence.

Pour chacune des deux années de culture, la réponse du rendement à la dose d'azote appliquée n'est cependant pas significative sur plus du tiers des zones à l'étude (26/59). Pour neuf de ces zones à l'étude, la fourniture élevée du sol en azote explique cette absence de réponse aux engrais minéraux. Ces résultats renforcent la pertinence de prendre en compte la minéralisation de l'azote dans les sols riches en matière organique, les reliquats de fertilisation automnale et les arrières-effets des engrais dans la formulation des recommandations de fertilisation azotée. Plusieurs autres facteurs, autres que la dynamique de l'azote du sol, ont contribué à l'absence de corrélation significative entre rendement et dose d'azote dans onze zones à l'étude. Les facteurs en cause incluent au premier plan de mauvaises conditions d'égouttement associées à une condition physique du sol défavorable. Une population inégale liée à de mauvaises conditions de semis, l'inondation, la prédation des oies et une infestation de chrysomèle sont au nombre des autres facteurs identifiés.

Les corrélations évaluées entre les rendements et les propriétés du sol confirment la disponibilité de l'azote du sol comme facteur déterminant du rendement des cultures. La fourniture du sol en azote, largement tributaire du processus de minéralisation de l'azote organique du sol, se traduit en une réduction tangible de la dose complémentaire d'azote minéral nécessaire afin d'atteindre

le rendement optimum. Dans l'ensemble, les résultats confirment la pertinence de la prise en compte du taux de nitrates du sol dans la formulation de la recommandation d'apport de N en post-levée. La relation observée entre la teneur du sol et la dose optimale tend à confirmer le seuil de 20 ppm N au-delà duquel l'apport de N sur le rendement du maïs est marginal.

Les corrélations entre les indicateurs de la structure du sol le taux de nitrates observé 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. L'implication pratique liée à ces observations constitue l'importance à accorder au maintien d'un taux de matière organique élevé et d'une condition physique du sol favorable pour assurer la disponibilité de l'azote à la culture, au bon moment (post-levée).

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. De façon systématique, l'apport de N en post-levée au-dessus du niveau de fertilisation optimal se traduit en une accumulation proportionnelle de nitrates inutilisés en fin de saison. Au taux optimal d'apport de N, les stocks moyens de N en post-récolte (0-60 cm) se situent sous la barre de 50 kg N /ha pour les deux années à l'étude. Le seuil critique de teneurs en nitrates résiduels de 80 kg N-NO<sub>3</sub>/ha est atteint lorsque l'apport d'azote excède, en moyenne, d'environ 100 kg N/ha la dose optimale. Les sols organiques se distinguent des sols minéraux par des NRS particulièrement élevés en fin de saison, se situant entre 225 et 325 kg N/ha. Le processus de minéralisation de la matière organique en cours de saison de croissance expliquerait ce bilan azoté nettement excédentaire.

Enfin, si le taux de nitrates observé en post-levée est corrélé avec le rendement optimal de la culture de maïs ( $r=0.32^*$ ), ce dernier n'est pas corrélé avec le stock de nitrates présent dans le sol en fin de saison. Cette observation illustre 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, ne se traduisant pas par une augmentation du taux de nitrates résiduels du sol. Il y a donc complémentarité entre les objectifs de rendement économique et environnementaux.

L'analyse sommaire de la rentabilité de l'approche de la gestion localisée des champs, inspirée des résultats du volet agronomique de l'étude, indique que l'investissement dans un système de géolocalisation sera rentable la plupart du temps. Il faut préciser que les résultats agronomiques montrent que ce n'est pas dans tous les cas que des réductions de fertilisant sont possibles. Ainsi, l'analyse de sensibilité 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 de 24 kg N/ha ou plus serait obtenue.

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

Le recours à l'adaptation québécoise du modèle SWAT, calé et validé à partir de suivis hydrologiques de petits bassins versants expérimentaux de la Montérégie 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 deux bassins à l'étude. Les résultats des sept scénarios de fertilisation azotée du maïs à l'étude mettent en évidence l'influence de la période (pré-semis vs post-levée) et des taux d'apports de N sur les exportations de nitrates à l'exutoire des ruisseaux. Le passage d'une fertilisation azotée en pré-semis à des apports fractionnée en post-levée diminue les pertes prédites 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 prédites de nitrates. Les résultats des simulations indiquent en effet une grande sensibilité du modèle aux apports de N qui dépassent les besoins des cultures. Une augmentation des apports en post-levée de 100 kg N/ha au-dessus de la balise agronomique (150 N) double ainsi les prédictions d'exportation de nitrates vers le ruisseau. Ces prédictions sont cohérentes avec les nitrates résiduels du sol (NRS) mesurés en fin de saison dans le cadre

du volet agronomique du projet, qui associe le seuil critique de 80 kg N/ha de NRS à un taux moyen de sur-fertilisation de l'ordre de 100 kg N/ha.

La cohérence entre les prédictions du devenir de l'azote dans le cadre du volet hydrologique du projet et les reliquats de N observés en fin de saison en parcelles sur-fertilisées dans le cadre du volet agronomique du projet ReZoTaGe encouragent la mise à contribution des études à portée hydrologique dans le développement des outils de recommandation de la fertilisation azotée des cultures. Si le modèle hydrologique arrive à bien prédire les flux à l'exutoire du ruisseau, encore faut-il s'assurer que les routines terrestres du cycle de l'azote soient bien décrites. Il y a donc intérêt, dans les prochaines études dédiées au devenir de l'azote, à coupler les observations de la transformation du stock d'azote avec celles de sa mobilité au travers du profil de sol.

Enfin, retenons qu'au plan environnemental, l'impact de conditions de pluviosité élevée en saison de croissance s'inscrit en double sur les risques de pertes d'azote dans l'eau de surface. D'une part, l'augmentation de la hauteur d'eau drainée implique un entraînement plus important de nitrates vers les drains souterrains et le cours d'eau. D'autre part, ce tribut prélevé dans la couche arable du sol entraîne la dose optimale d'engrais azoté à la hausse. Si le recours au dosage des nitrates en post-levée permet un certain « contrôle à l'entrée » en prévenant la sur-fertilisation de la parcelle, elle ne permet cependant pas de retenir les nitrates dans le profil du sol. Cette étude démontre l'intérêt de considérer un « contrôle à la sortie » des nitrates, complémentaire à l'approche des apports sur mesure. Le drainage contrôlé, permettant de maintenir la nappe d'eau plus élevée en saison de croissance, mérite certainement notre attention dans la perspective de réduire les exportations de nitrates depuis la couche arable jusqu'au cours d'eau.

## **4. SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET**

---

Deux principaux constats ont pavé la voie à la réalisation du projet de recherche à la ferme RéZoTaGe. D'une part, les études antérieures réalisées sur le thème de la variabilité spatiale des propriétés des sols et des rendements de culture au Québec ont démontré que notre 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, les pertes d'azote particulièrement élevées dans certains bassins versants, atteignant plus de 60 kg N/ha en moyenne sur certains bassins dominés par la culture du maïs-grain, témoignent de gains économiques et environnementaux importants découlant d'une meilleure efficacité de la fertilisation azotée. La réalisation du projet ReZoTaGe a démontré que l'approche de gestion localisée du parcellaire, appuyée par la reconnaissance de la variabilité des propriétés des sols à l'échelle des champs, permet 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.

Les cartes de propriétés des sols produites à l'échelle de régions couvrant plusieurs centaines de km<sup>2</sup>, selon une méthode originale développée au Québec, ont mis à profit différentes mesures à distance (télédétection) du relief et de la réflectance des sols. Les cartes permettent d'appréhender la variabilité dans les propriétés du sol et de moduler au besoin la régie entre les zones contrastées d'un même champ. L'utilitaire informatique développé supporte l'automatisation des principales procédures itératives à la base des calculs des propriétés de sol prédites. La facture libre du code source s'inscrit dans un courant de coopération scientifique favorable au développement et à l'optimisation des outils à référence spatiale en gestion localisée du parcellaire agricole au Québec.

Le volet agronomique du projet, déployé sur 870 micro-parcelles réparties en 58 zones d'étude de la Montérégie a démontré 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. Les corrélations évaluées entre les rendements et les propriétés du sol confirment la pertinence du dosage des nitrates en post-levée dans la formulation de la recommandation d'apport de N. Au-delà du seuil de 20 ppm N, 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 engrais dans la formulation des recommandations de fertilisation azotée. Les corrélations entre les indicateurs de la structure du sol 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 illustrent toute l'importance à accorder au maintien d'un taux de matière organique élevé et d'une condition physique du sol favorable pour assurer la disponibilité de l'azote à la culture, au bon moment (post-levée).

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. De façon systématique, 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. Le seuil critique de teneurs en nitrates résiduels de 80 kg N-NO<sub>3</sub>/ha est atteint lorsque l'apport d'azote excède, en moyenne, d'environ 100 kg N/ha la dose optimale. Les sols organiques se distinguent des sols minéraux par des taux de nitrates résiduels particulièrement élevés en fin de saison, se situant entre 225 et 325 kg N/ha. Le processus de minéralisation de la matière organique en cours de saison de croissance expliquerait ce bilan azoté nettement excédentaire. Enfin, si le taux de nitrates observé en post-levée est corrélé 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 en N (taux de nitrates en post-levée) permet des rendements économiques optimaux, qui ne se traduisent pas par une augmentation du taux de nitrates résiduels du sol. 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 de 24 kg N/ha ou plus serait obtenue.

Le volet hydrologique du projet, appuyé par l'adaptation québécoise du modèle SWAT, calé et validé à partir de suivis hydrologiques de petits bassins versants expérimentaux de la Montérégie, 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 deux bassins à l'étude. Les résultats des scénarios de fertilisation azotée du maïs indiquent que le passage d'une fertilisation azotée en pré-semis à des apports fractionnés en post-levée diminue les pertes prédites 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 prédites de nitrates. L'augmentation des apports en post-levée de 100 kg N/ha au-dessus des balises agronomiques (150 N) double les prédictions d'exportation de nitrates vers le ruisseau. La cohérence entre les prédictions du devenir de l'azote dans le cadre du volet hydrologique du projet et les reliquats de N observés en fin de saison en parcelles sur-fertilisées dans le cadre du volet agronomique du projet ReZoTaGe encouragent la mise à contribution des études à portée hydrologique dans le développement des outils de recommandation de la fertilisation azotée des cultures.

Enfin, retenons que le recours au dosage des nitrates en post-levée permet un certain « contrôle à l'entrée » en prévenant la sur-fertilisation de la parcelle, il ne permet cependant pas de retenir les nitrates dans le profil du sol. Une implication pratique issue du volet hydrologique de l'étude

s'avère être l'intérêt de considérer un « contrôle à la sortie » des nitrates, complémentaire à l'approche des apports sur mesure. Le drainage contrôlé, permettant de maintenir la nappe d'eau plus élevée en saison de croissance, mérite certainement notre attention dans la perspective de réduire les exportations de nitrates depuis la couche arable jusqu'au cours d'eau.

## **5. PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES**

---

Le plan détaillé de conciliation des dépenses dans le cadre du projet RéZoTaGe sont conciliées en annexe au présent rapport scientifique.

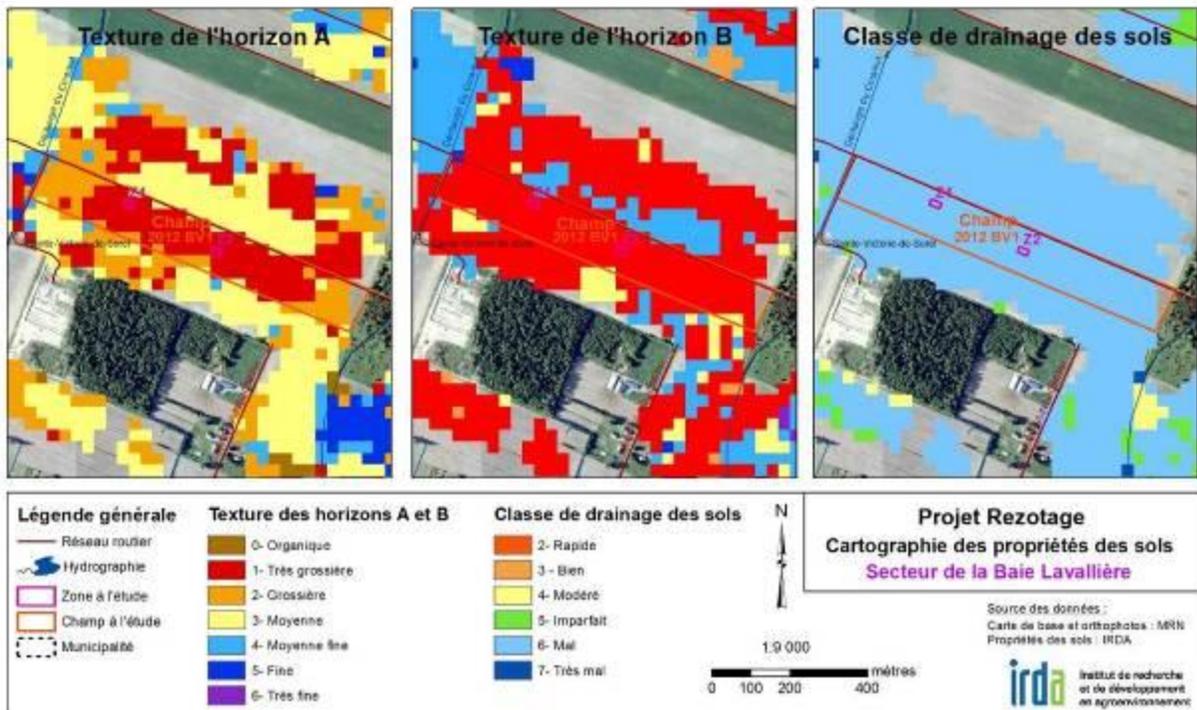
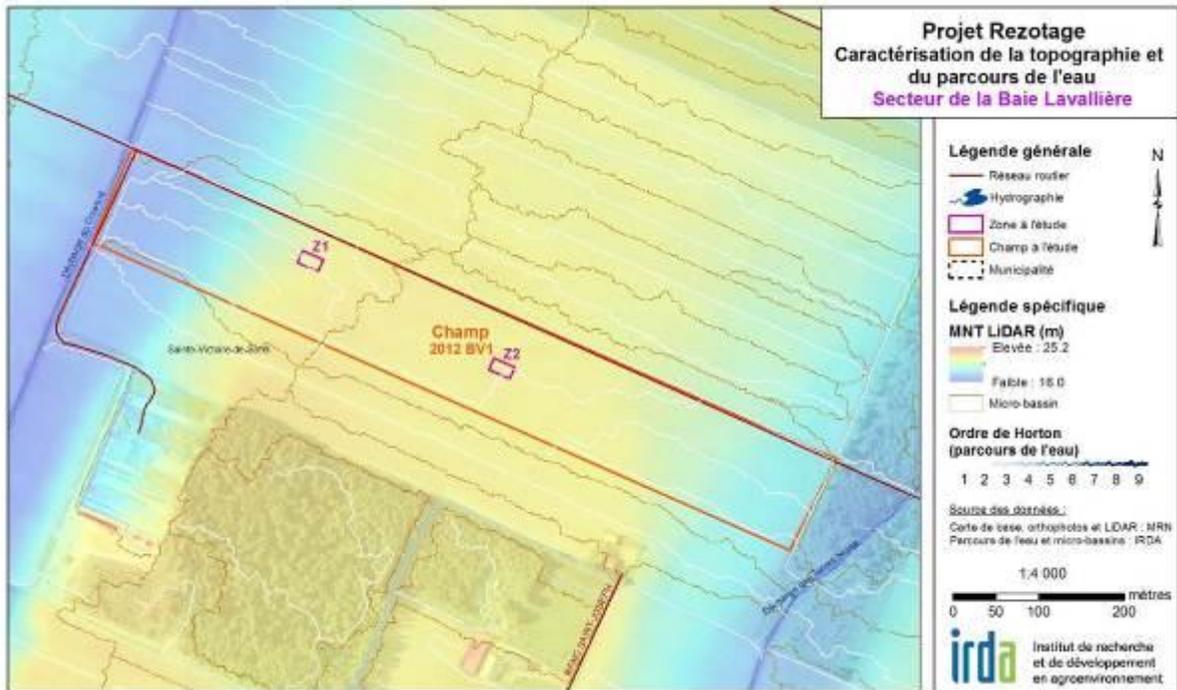
## **6. ANNEXES**

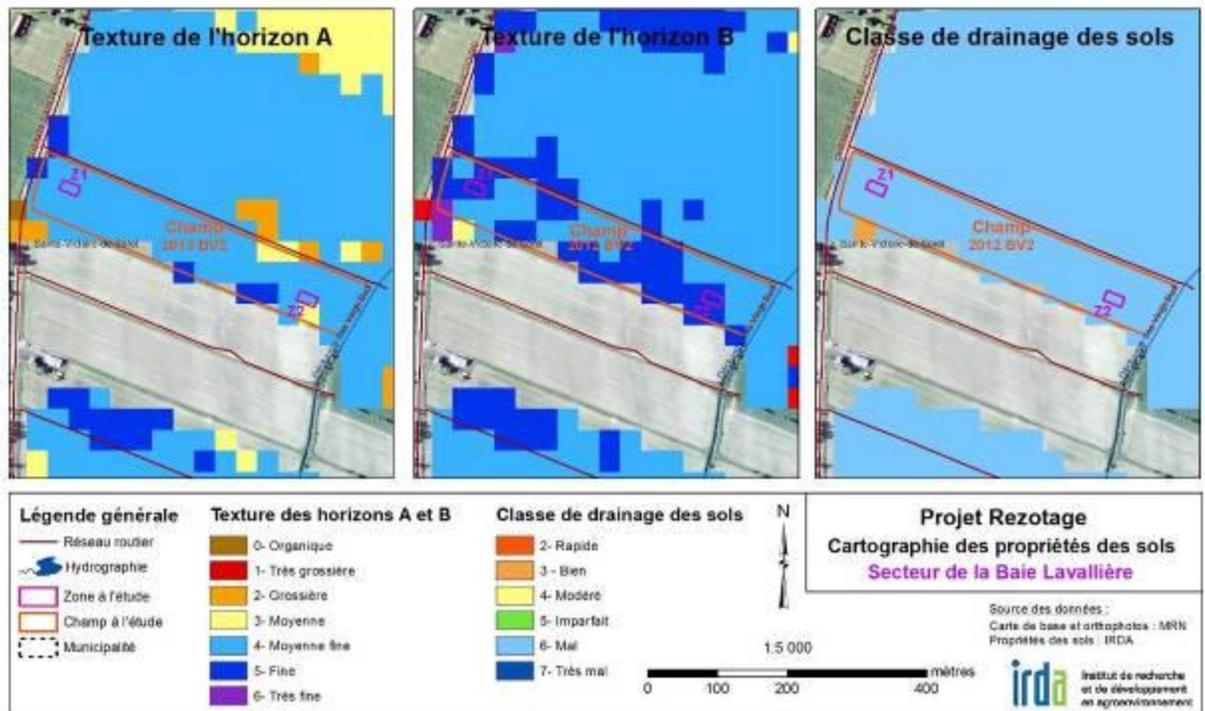
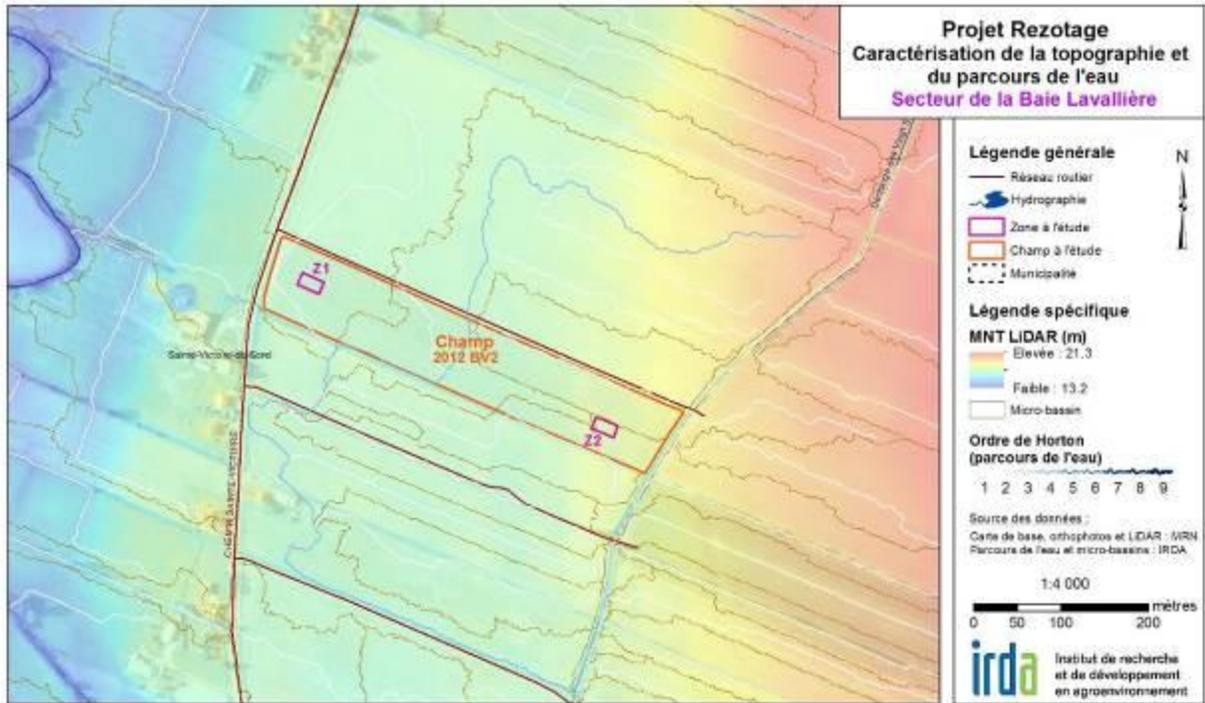
---

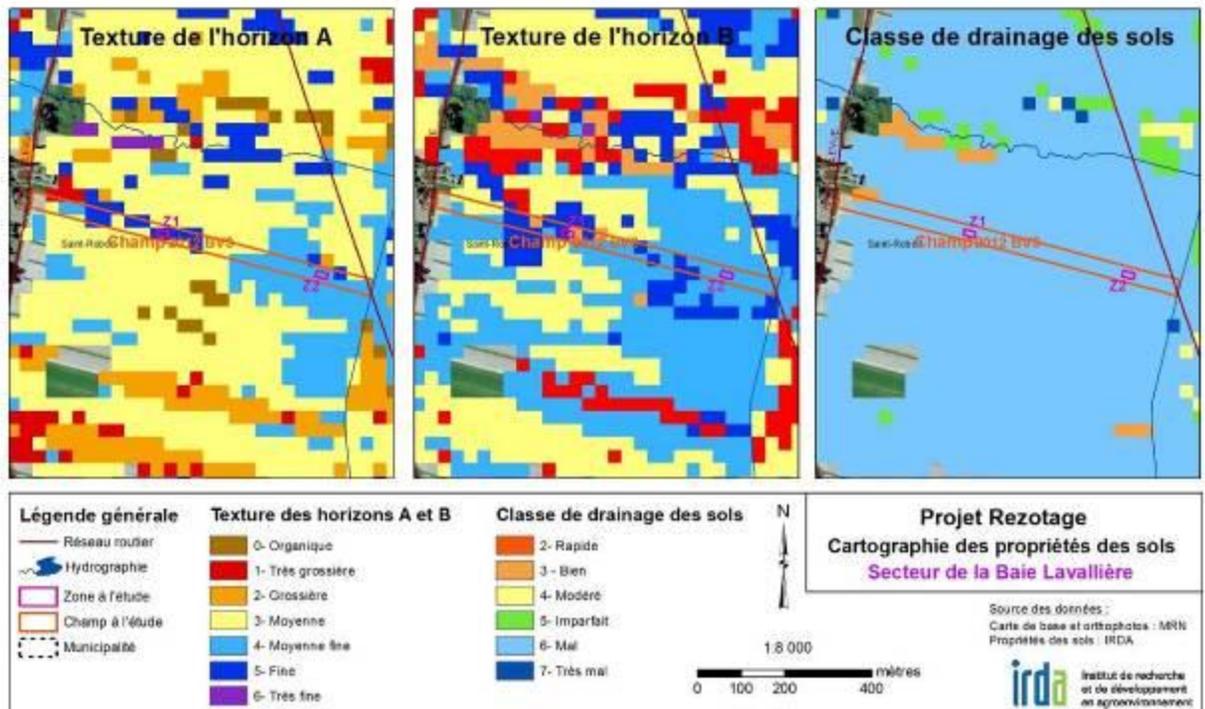
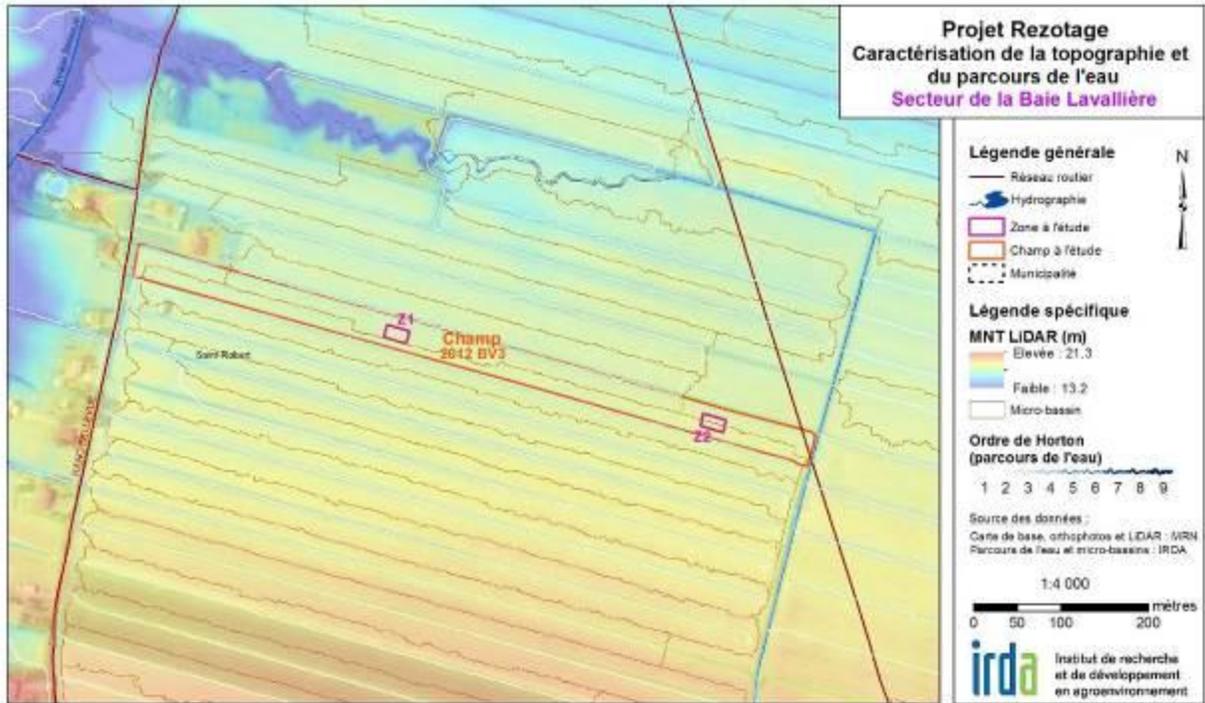
### **Annexe 1 : Cartographie haute résolution (1:5 000) du parcellaire**

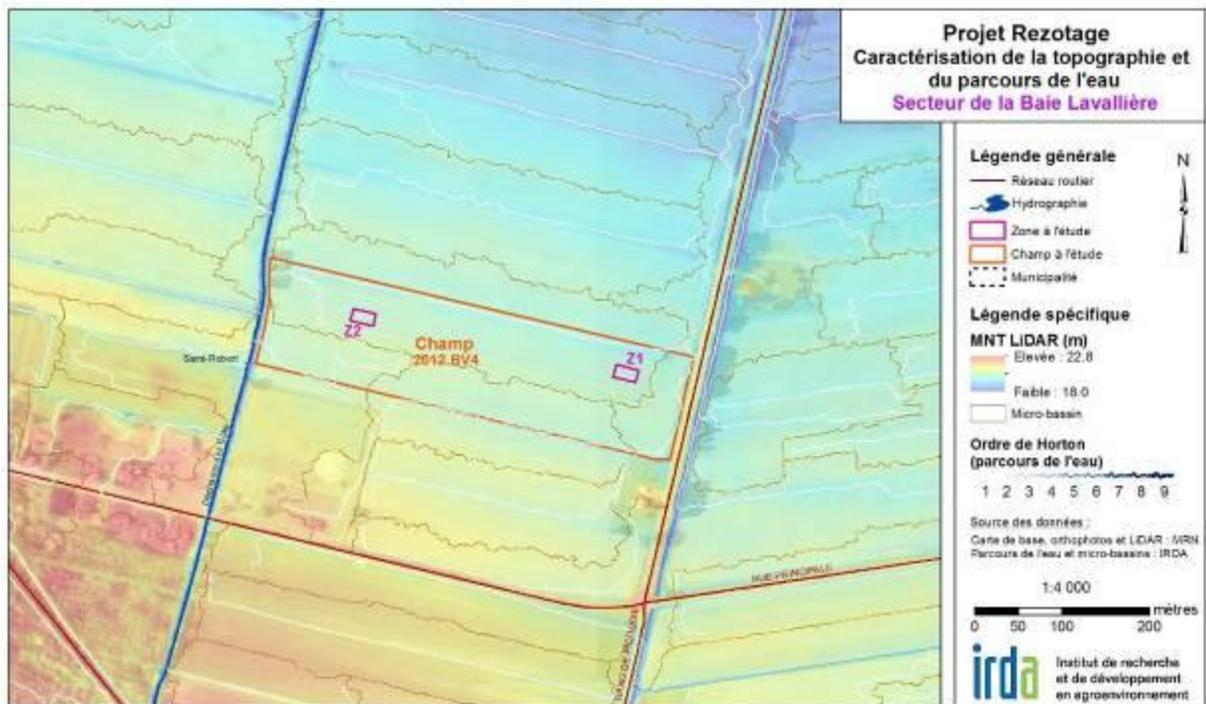
La présente annexe reproduit l'ensemble des cartes à l'échelle parcellaire réalisées dans le cadre du projet pour les 29 sites expérimentaux. Chaque site comporte deux zones distinctes de gestion qui ont fait l'objet d'une expérimentation en micro-parcelles de façon à évaluer la réponse de la culture à la fertilisation azotée. Pour certains champs, les prédictions de propriétés de sol sont manquantes puisque ces champs étaient situés à l'extérieur des limites des données disponibles. Aussi, certains champs d'un même producteur ont été cartographiés ensemble compte tenu de leur proximité.

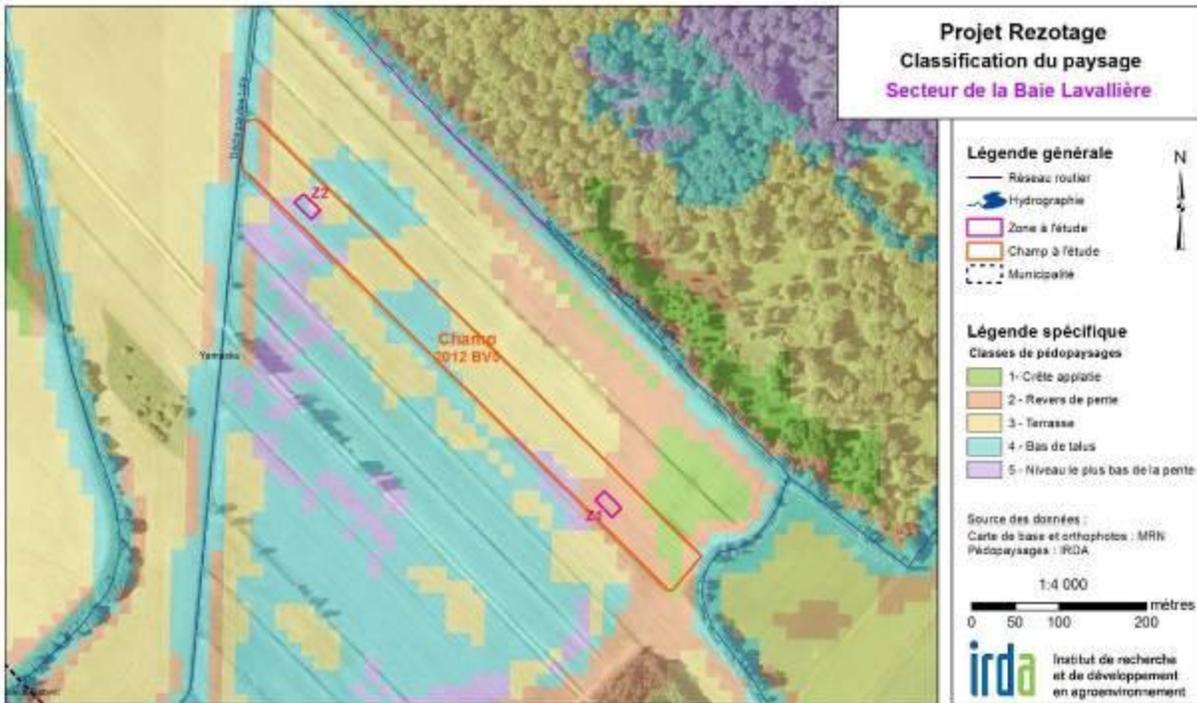
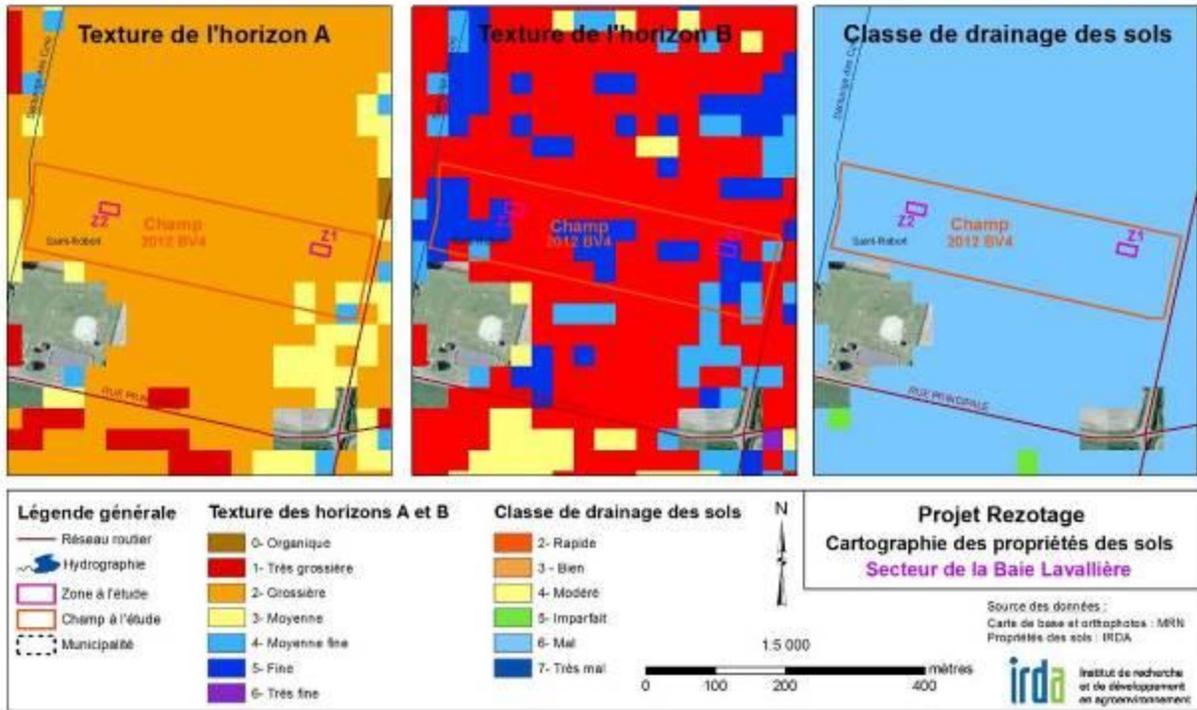
## Secteur de la Baie Lavallière

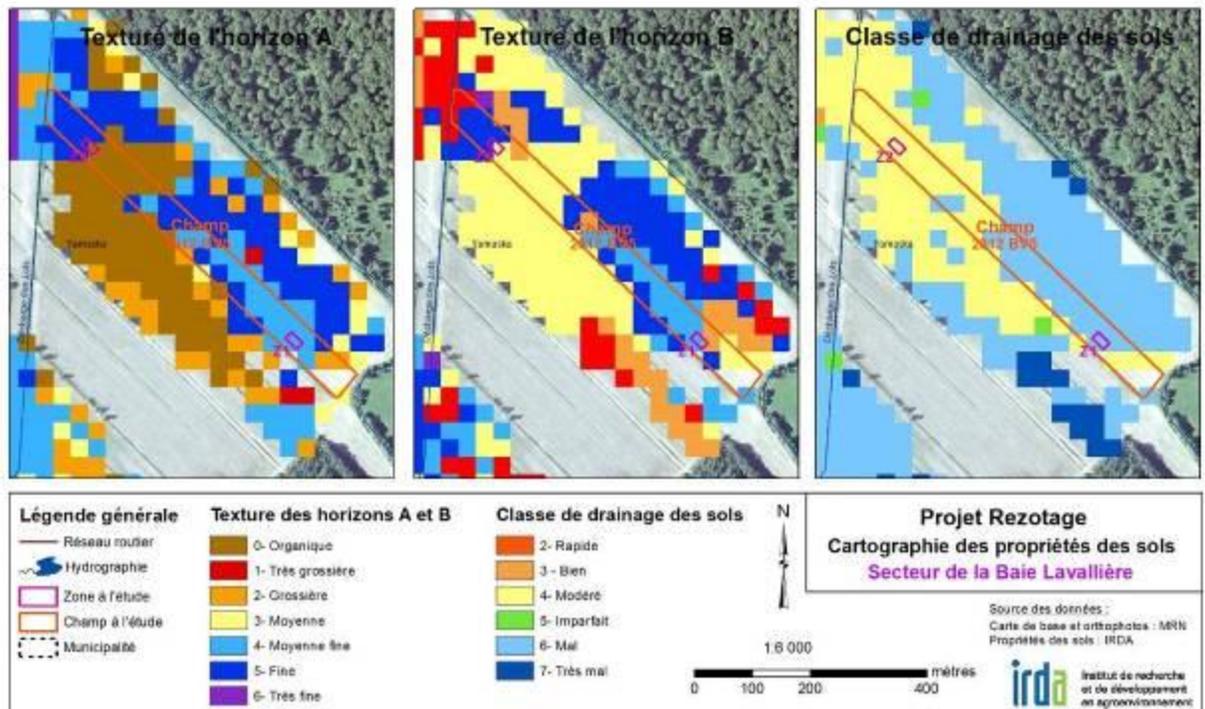
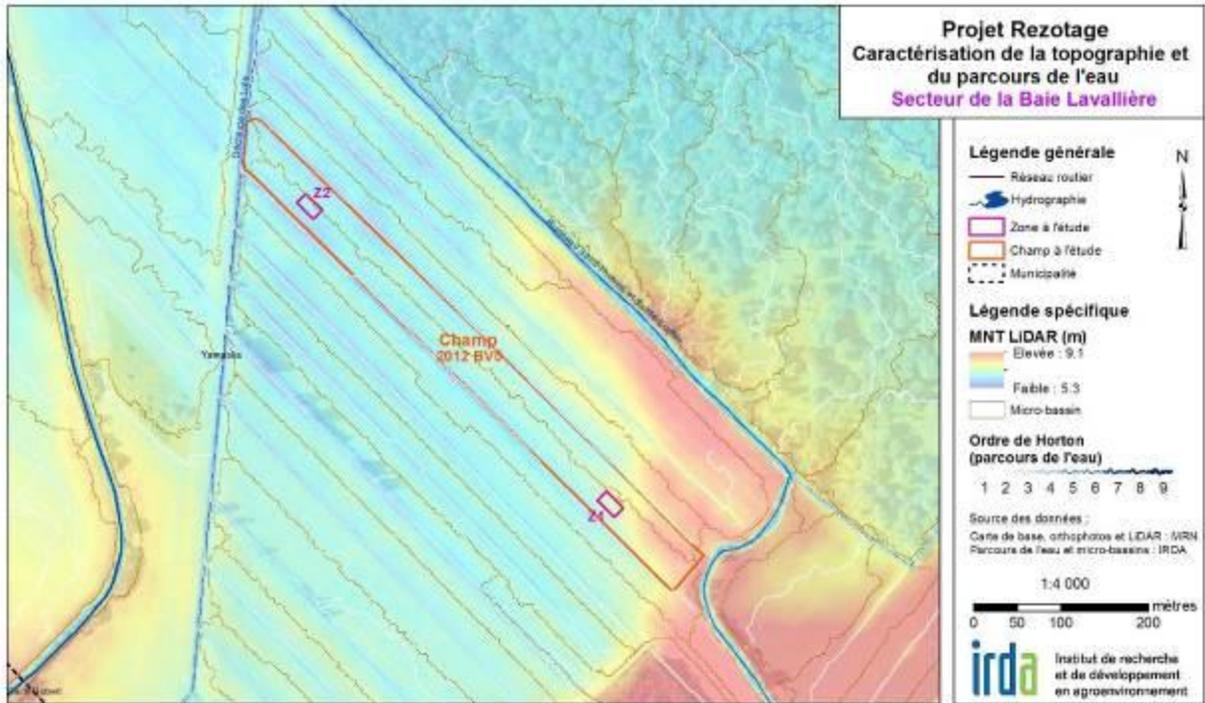


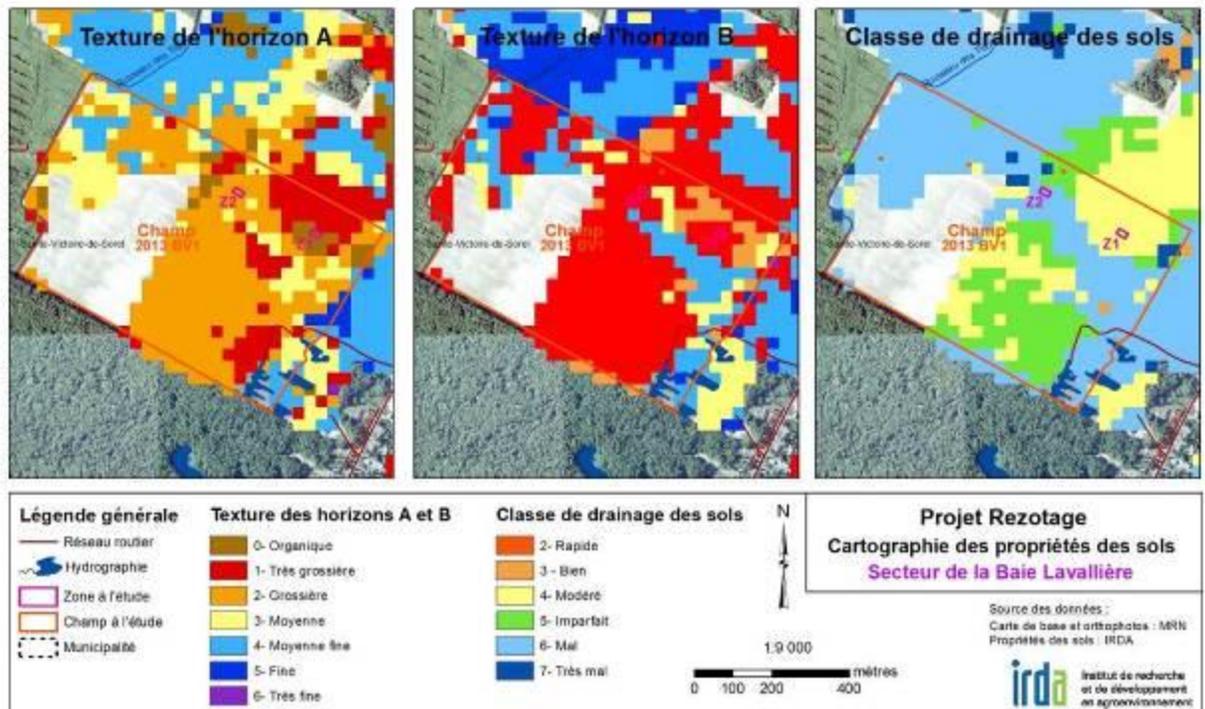
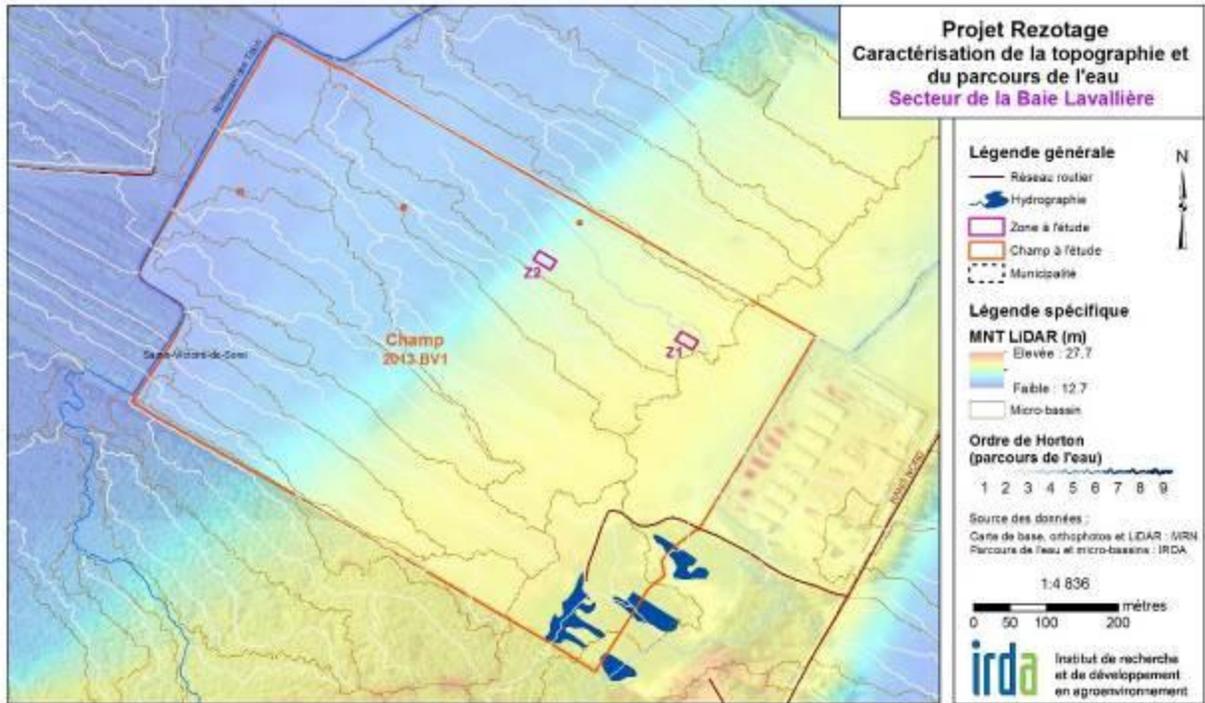


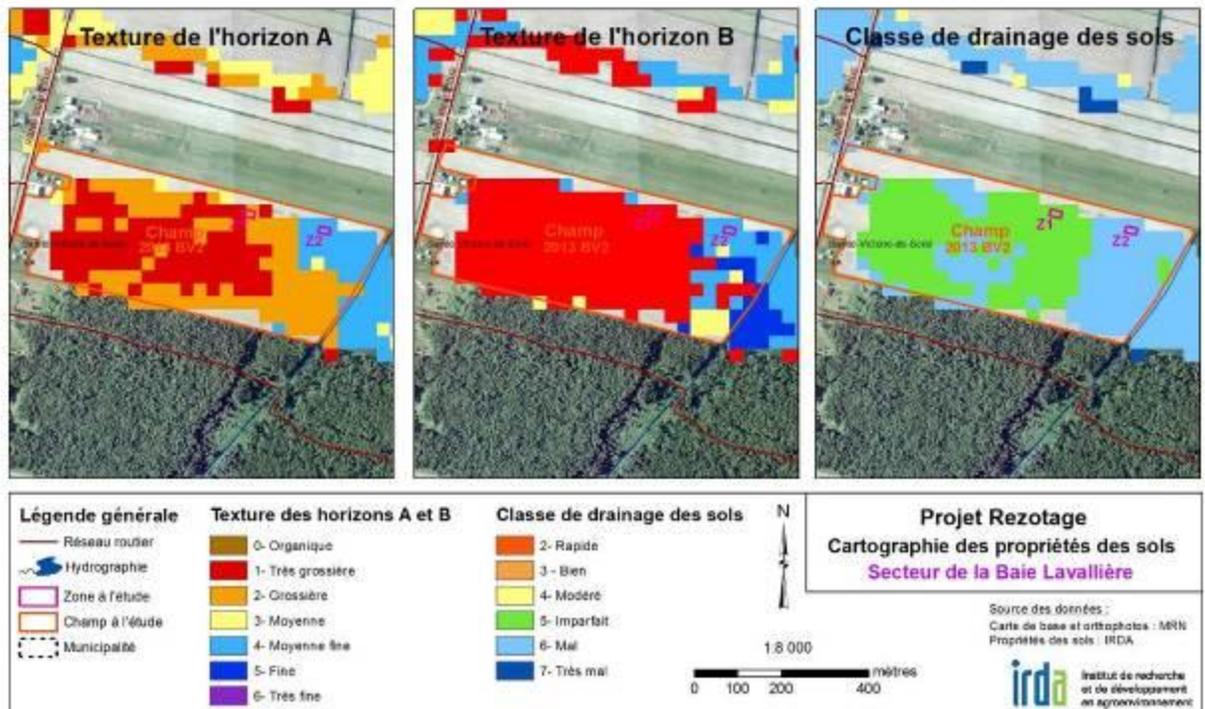
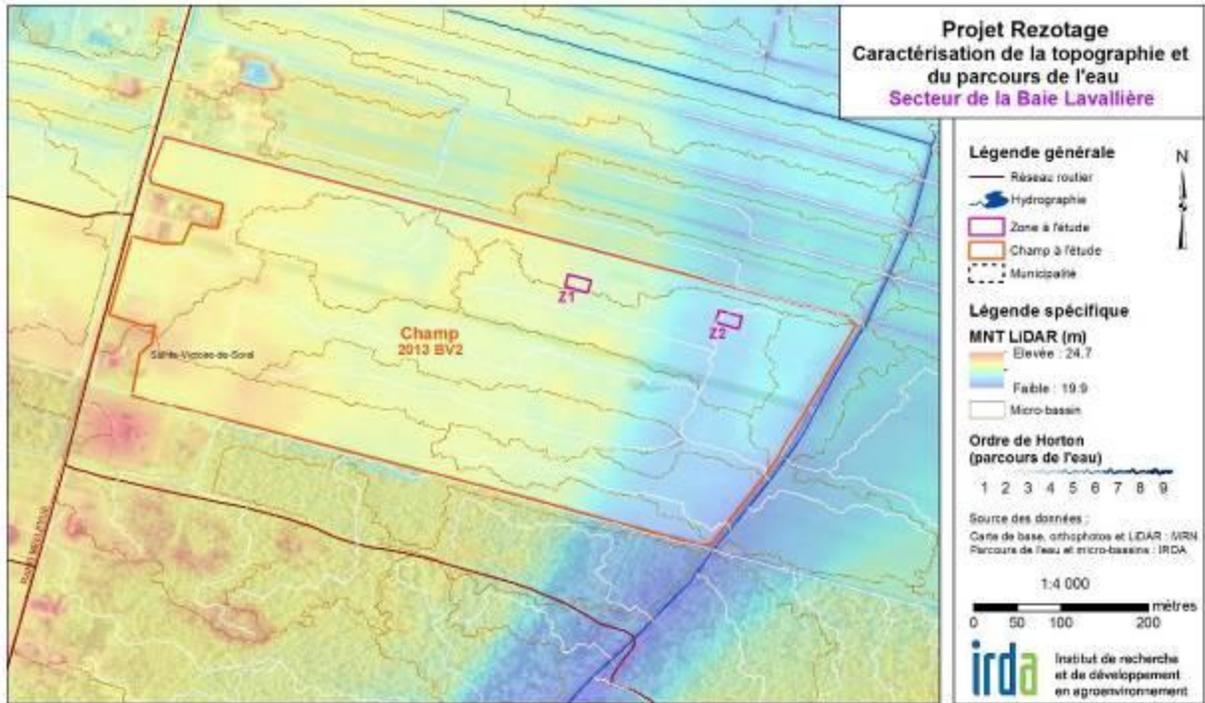


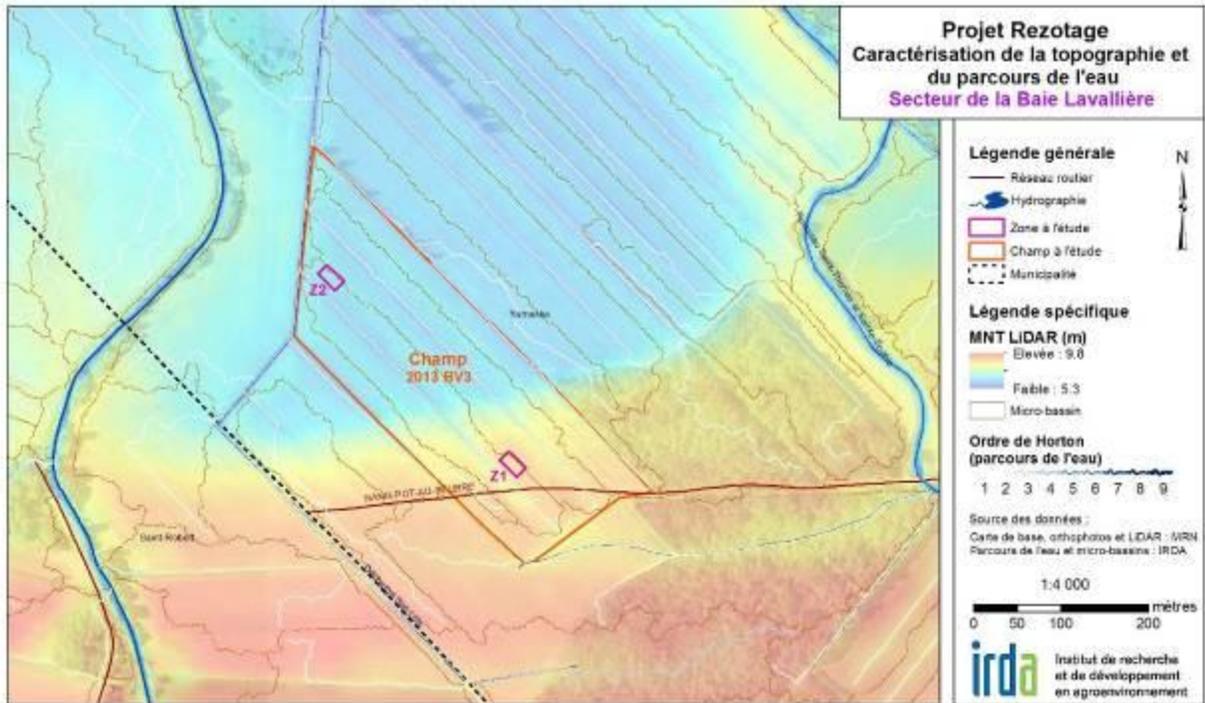
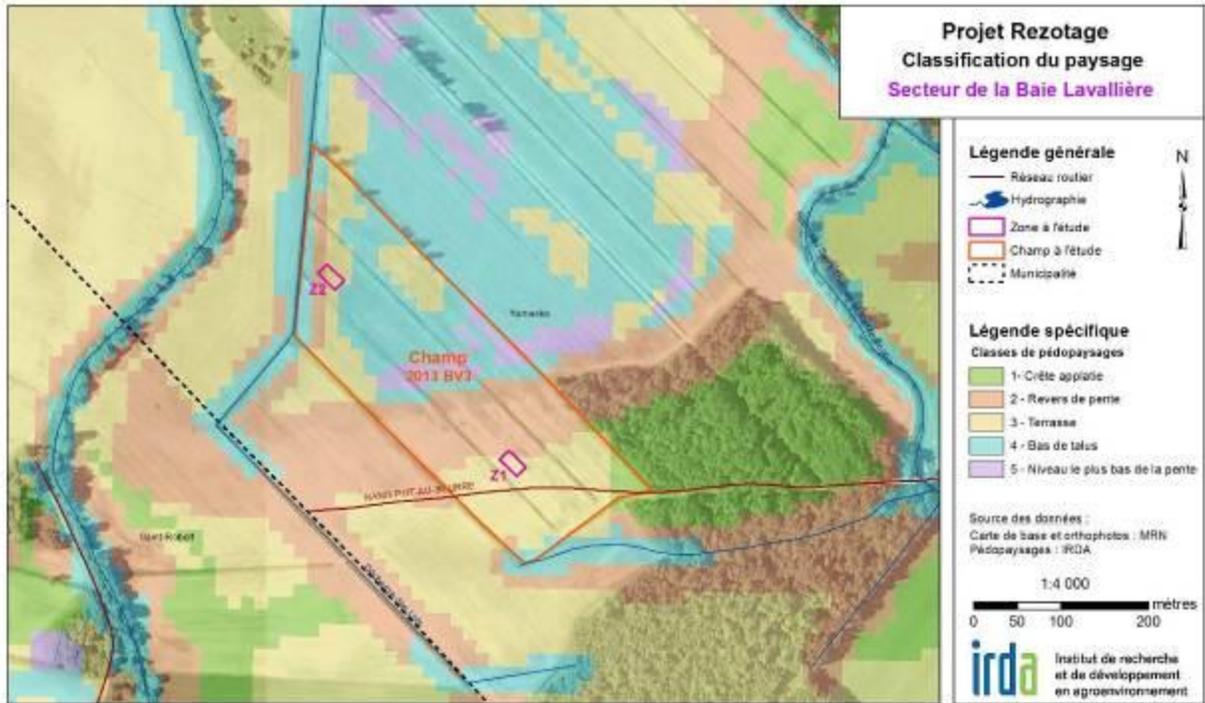


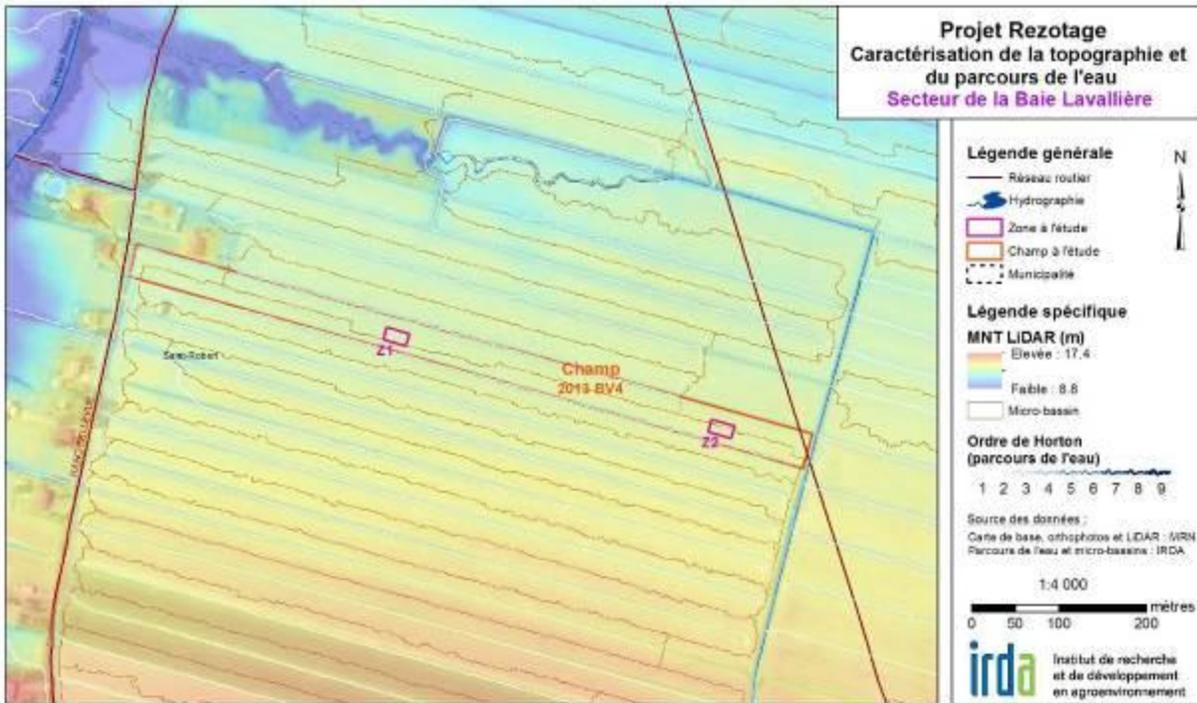
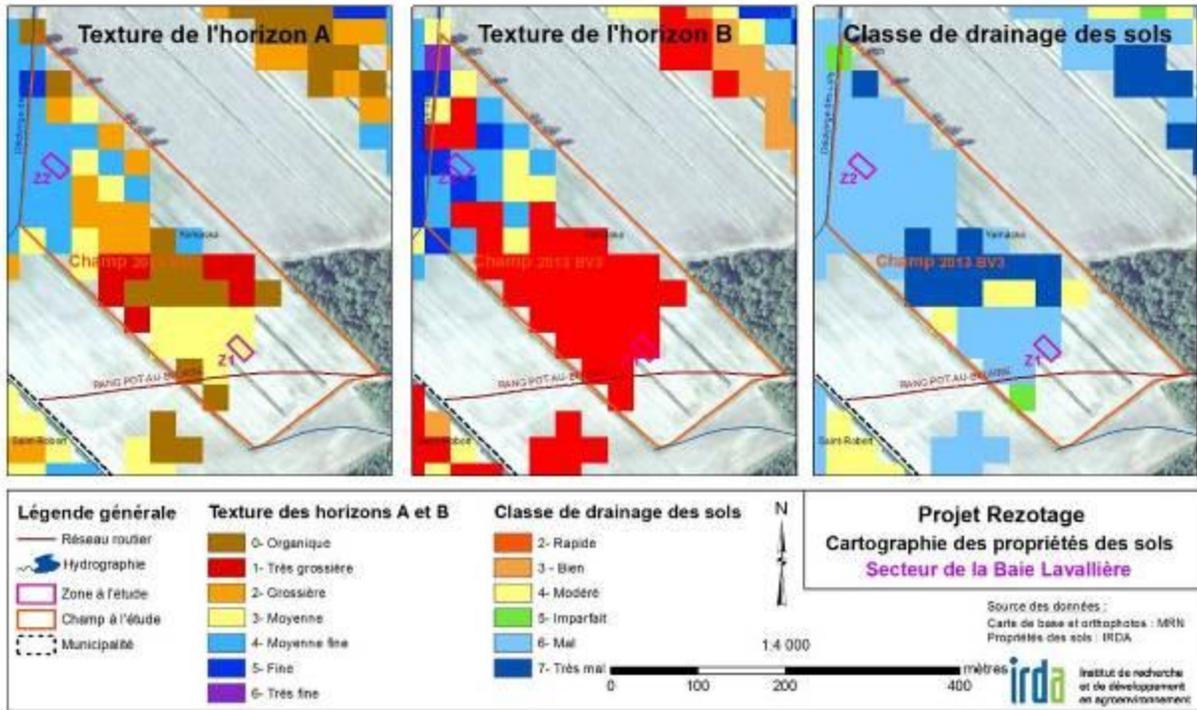


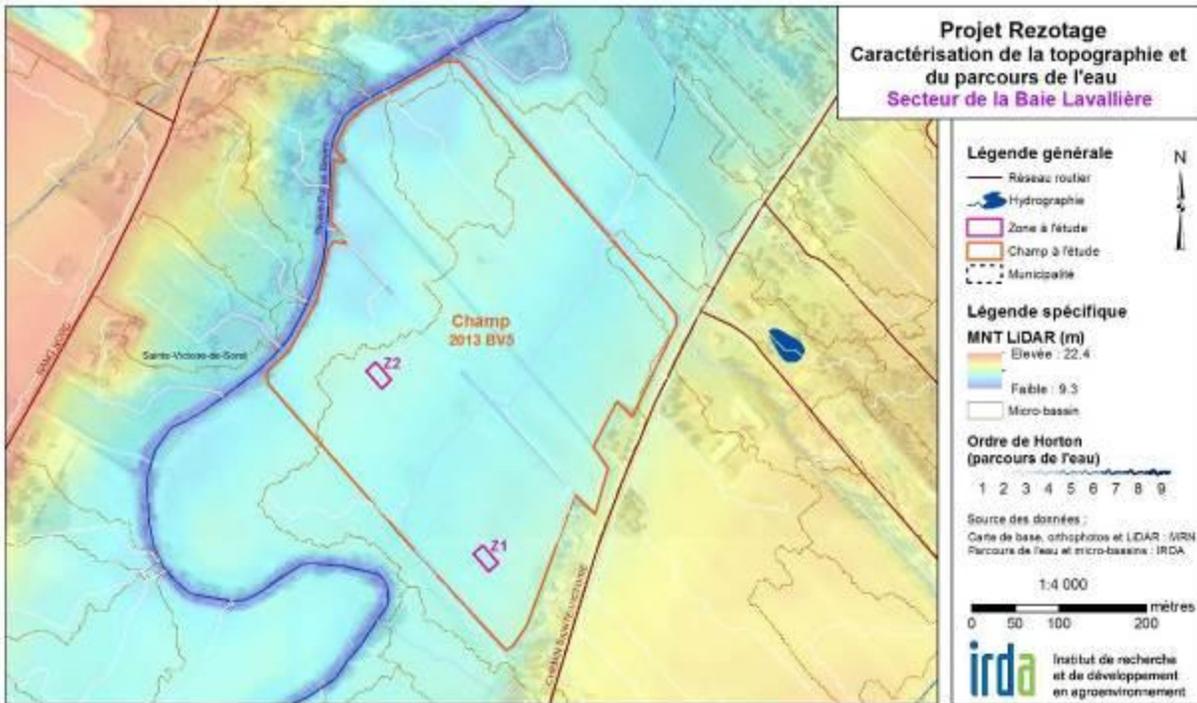
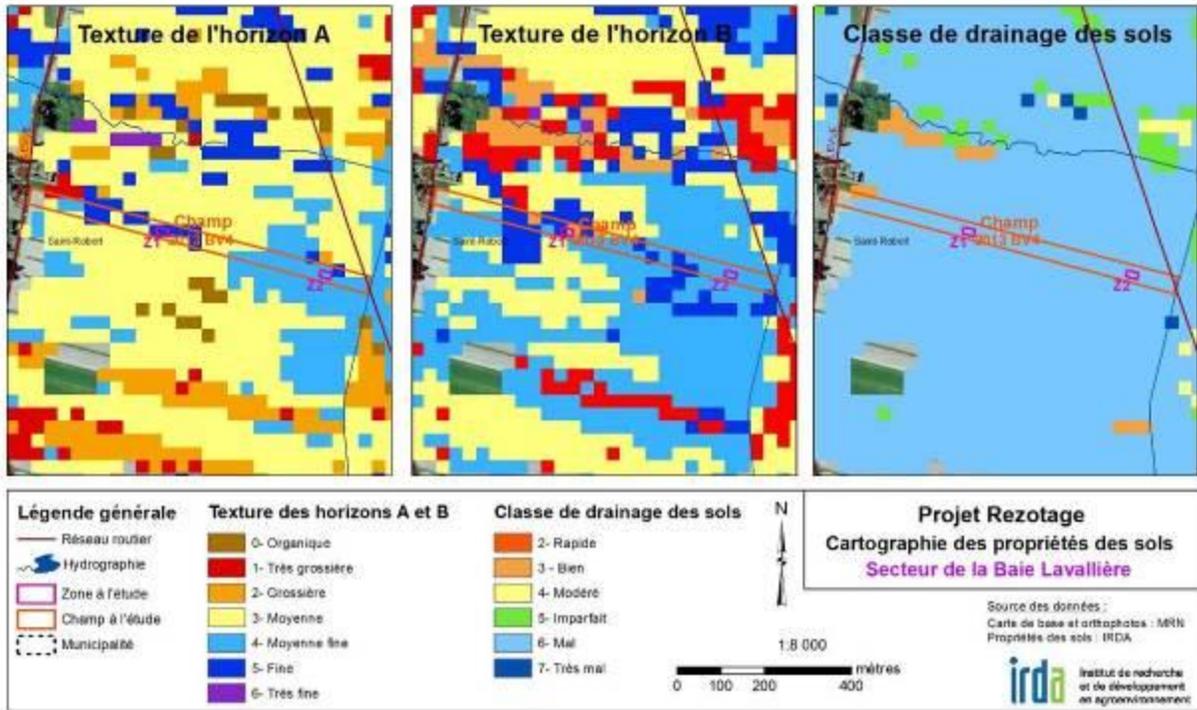


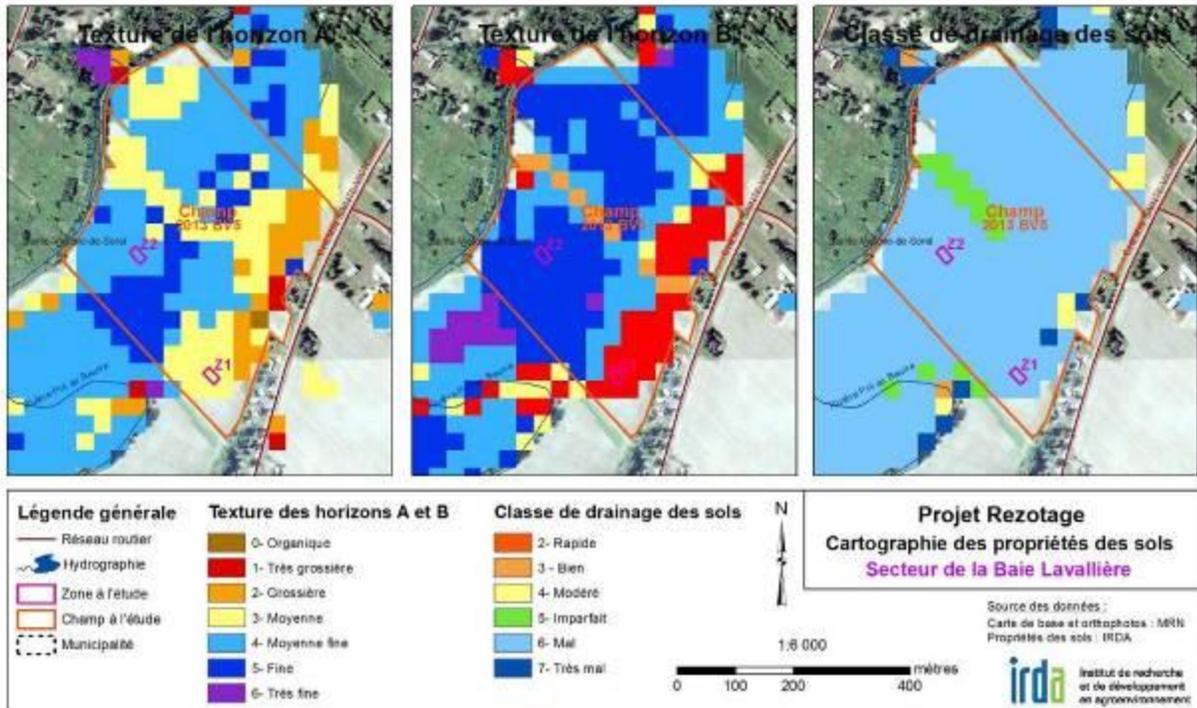




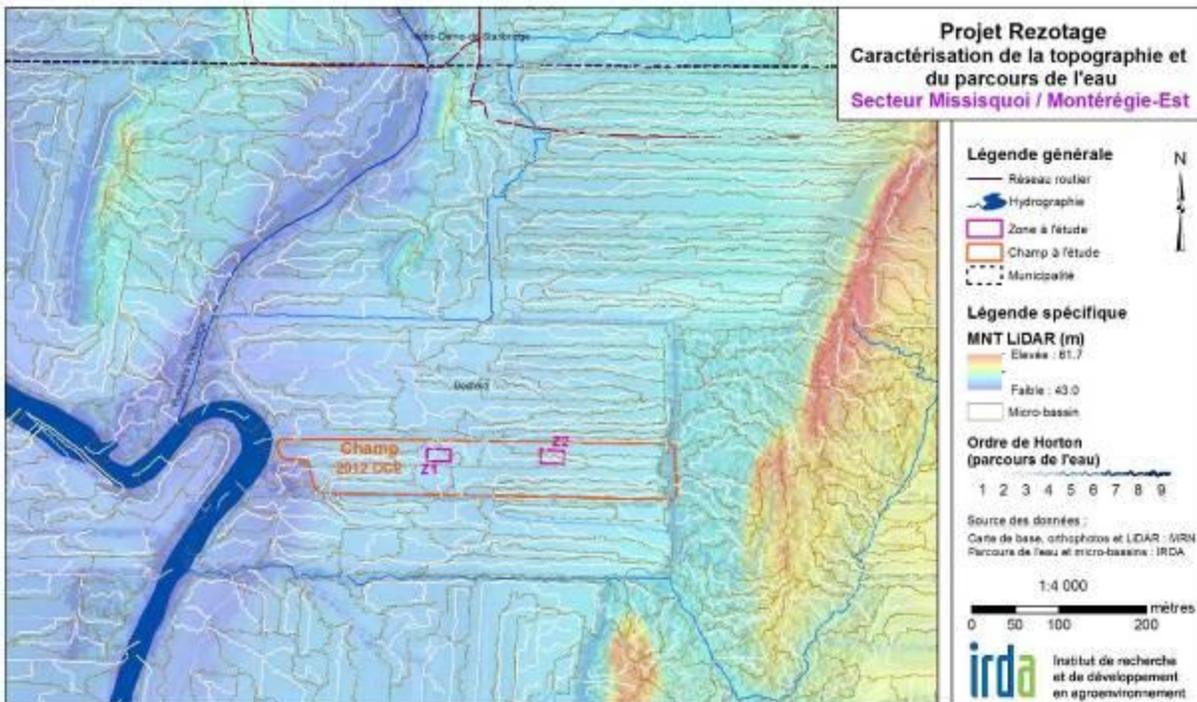
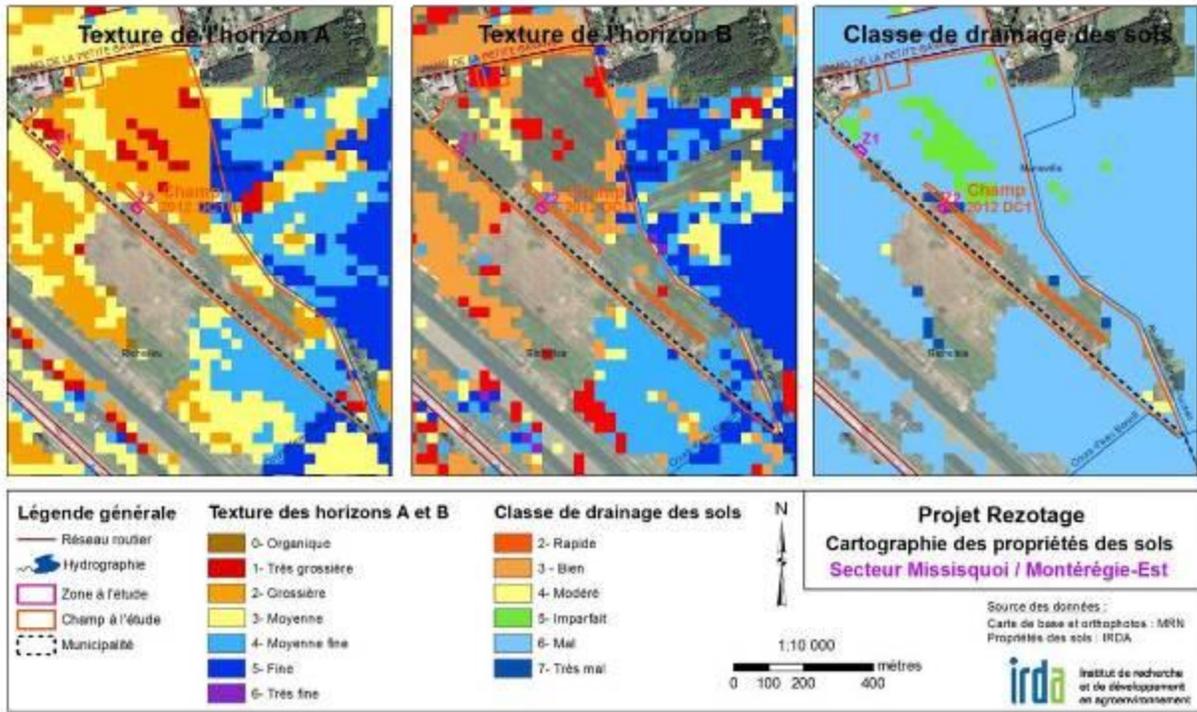


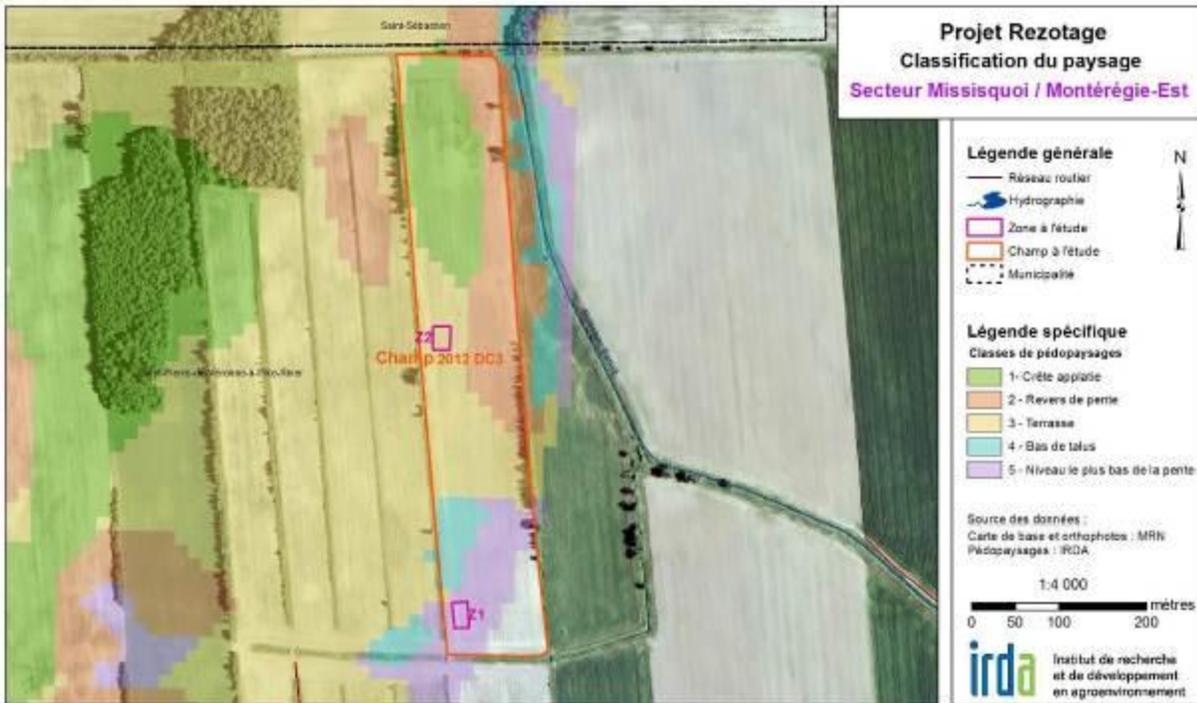
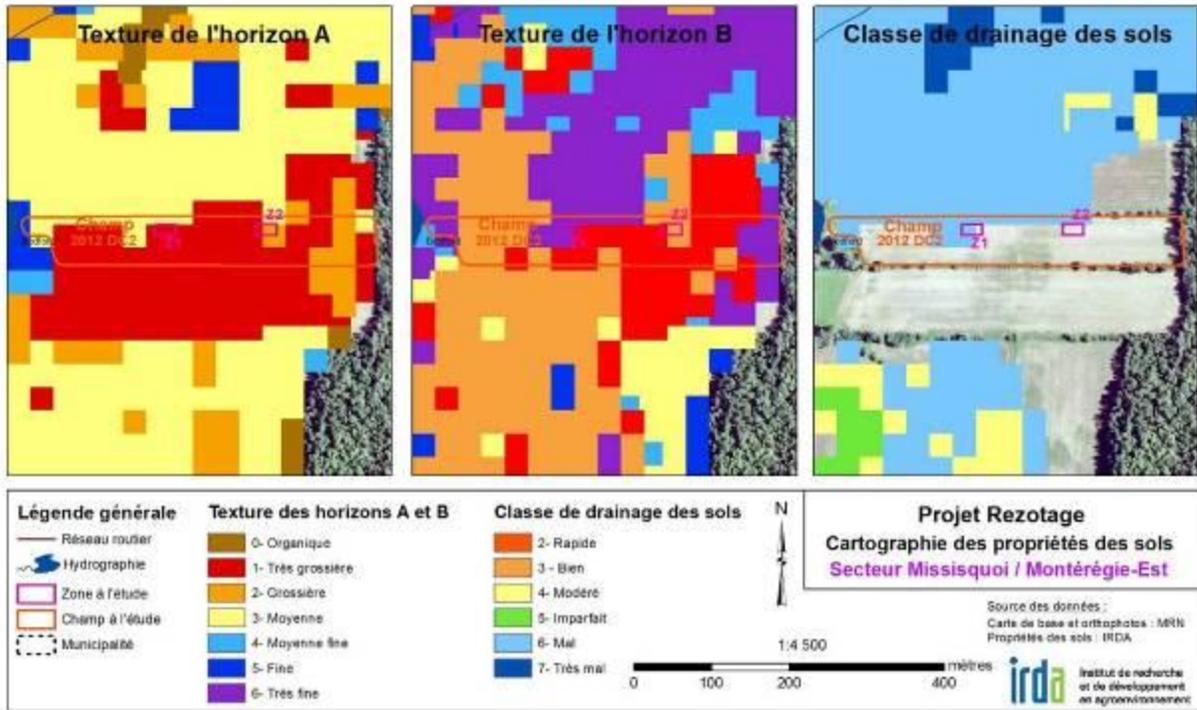


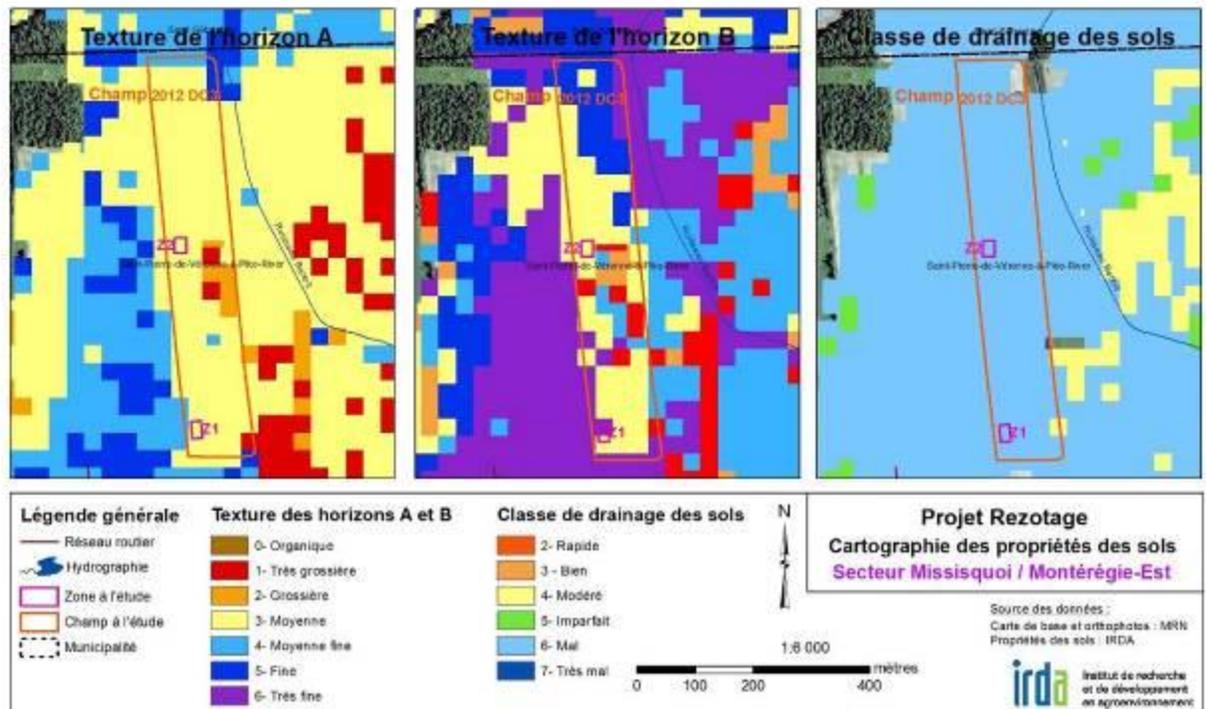
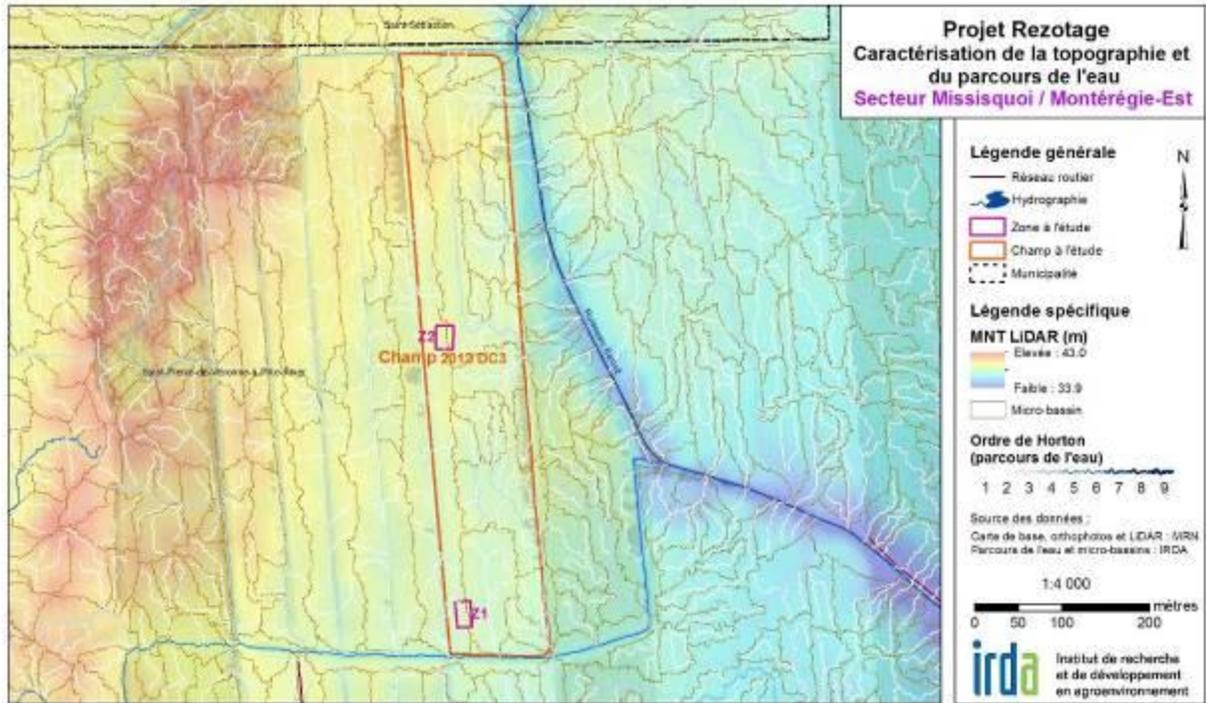


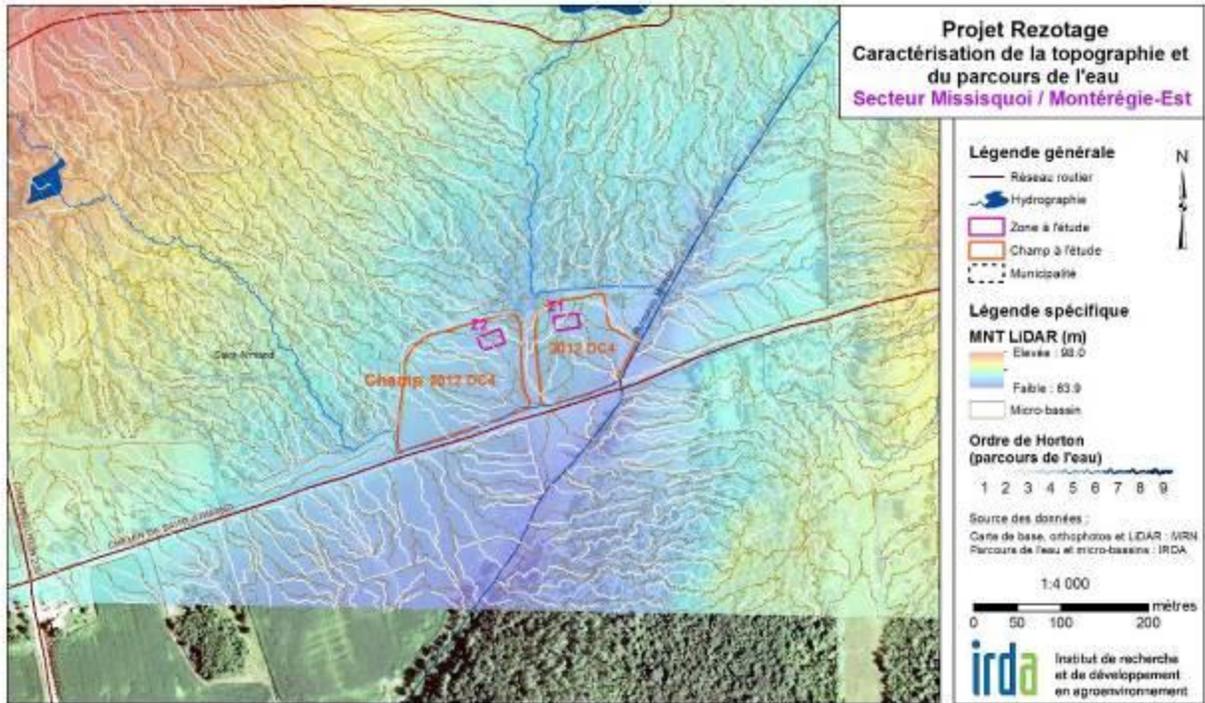


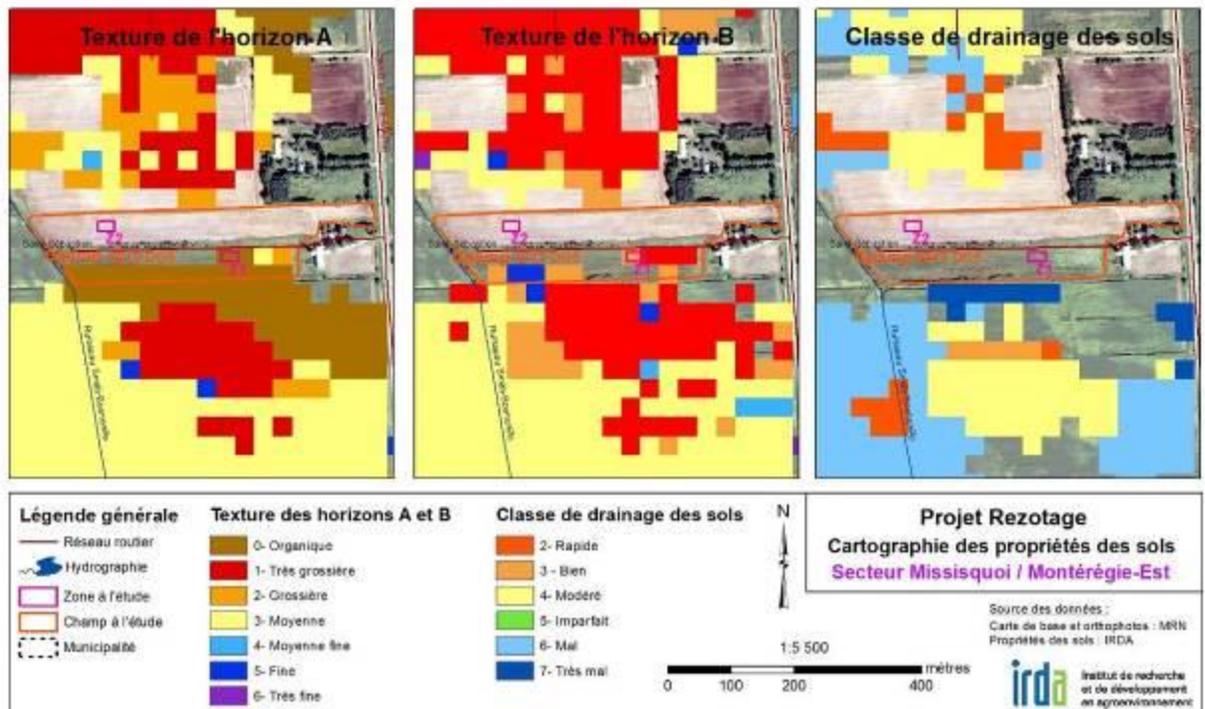
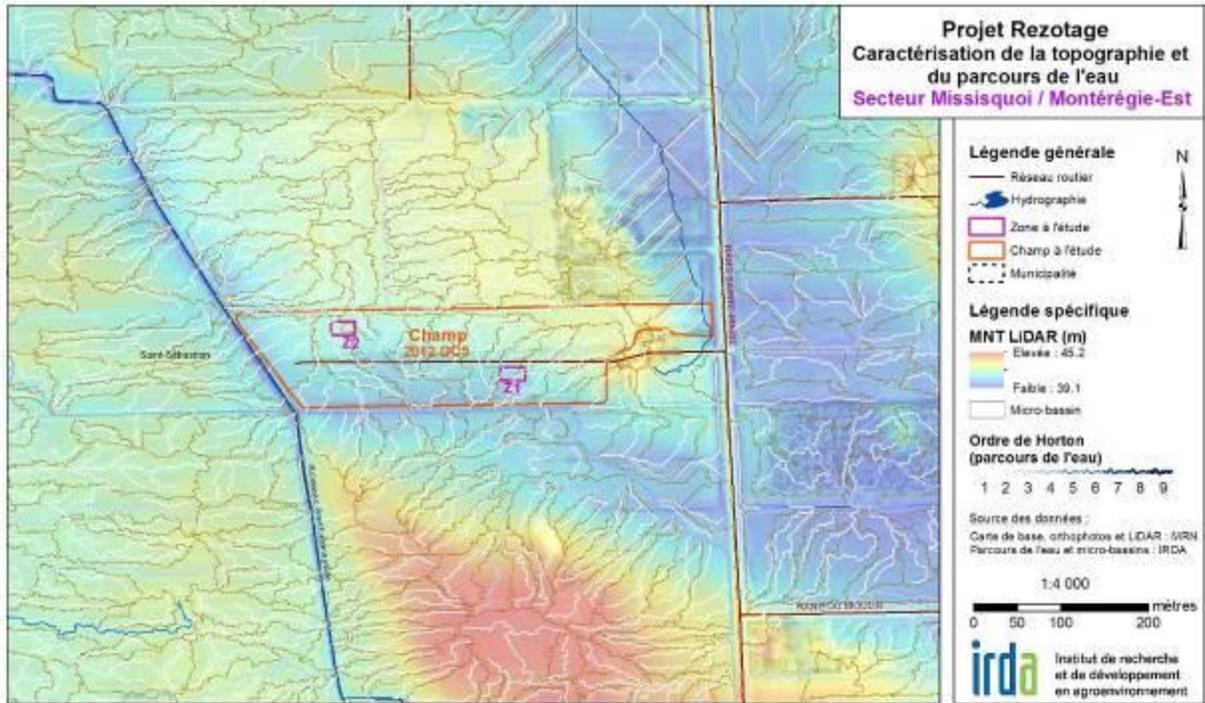
## Secteur Missisquoi / Montérégie-Est

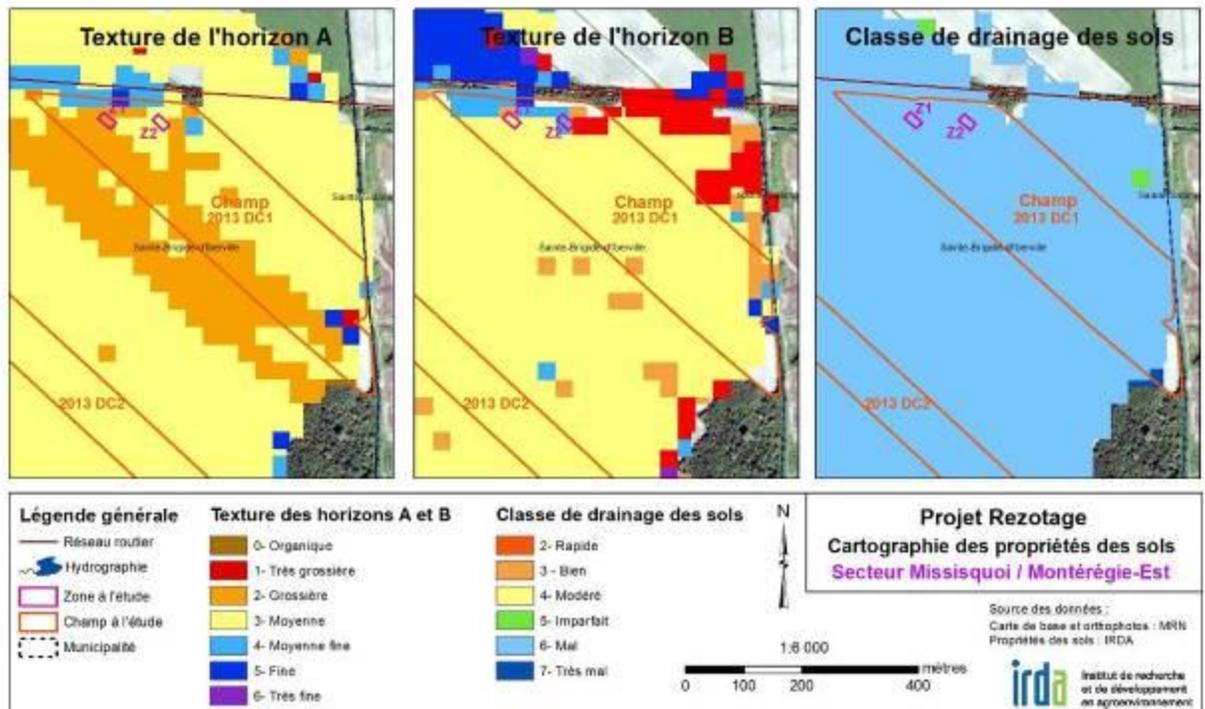
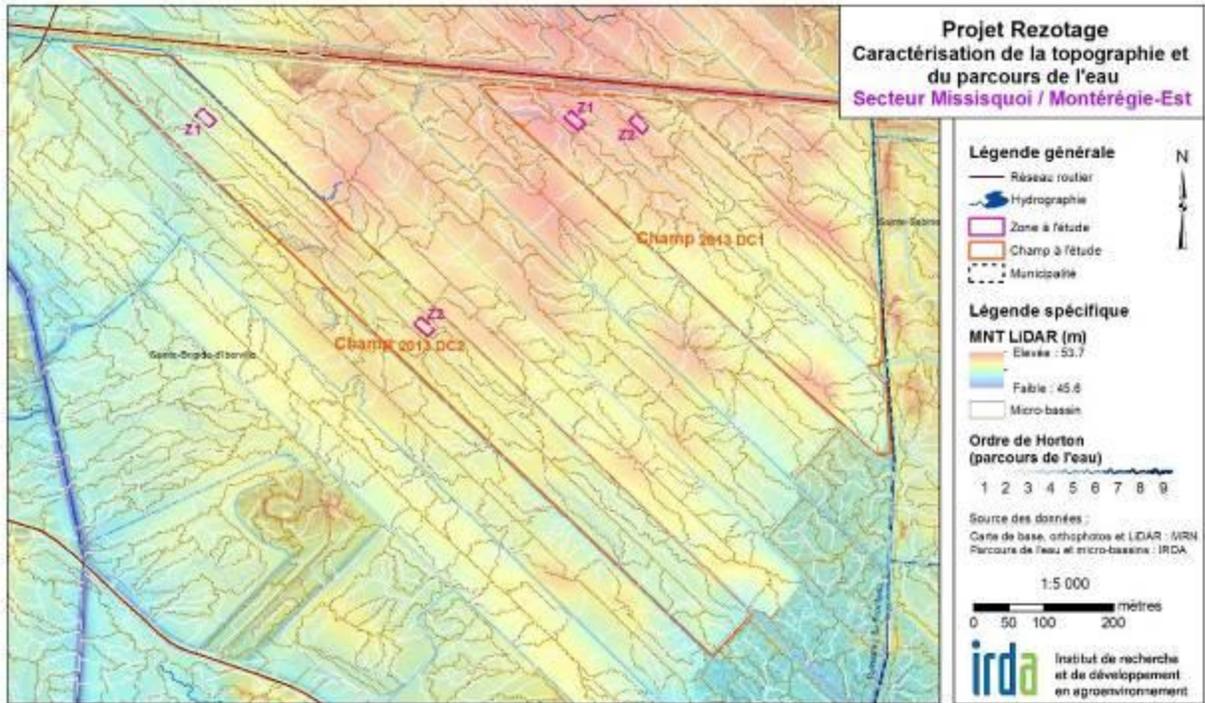


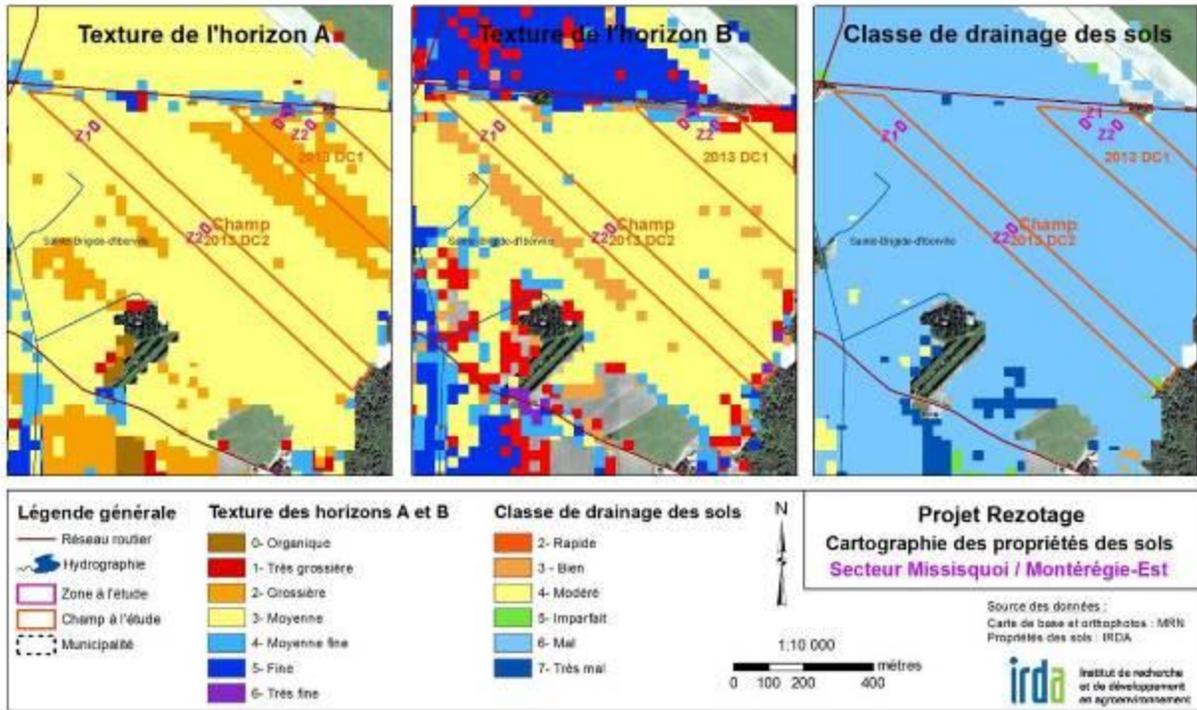


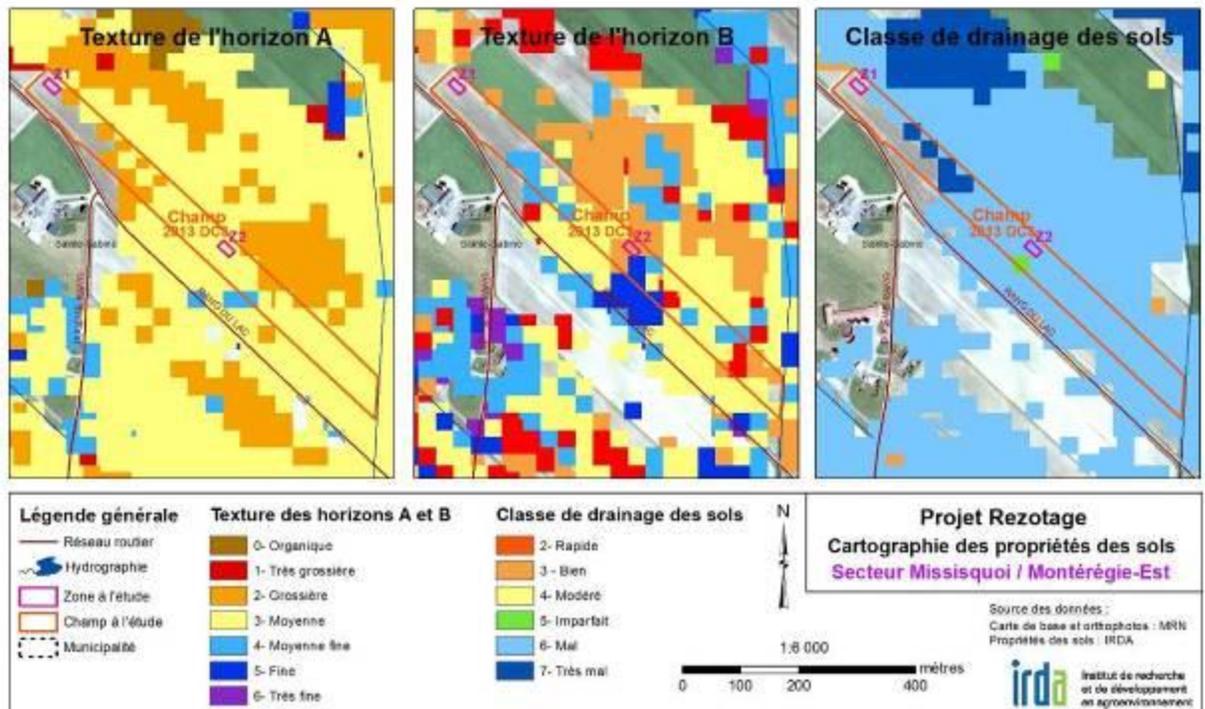
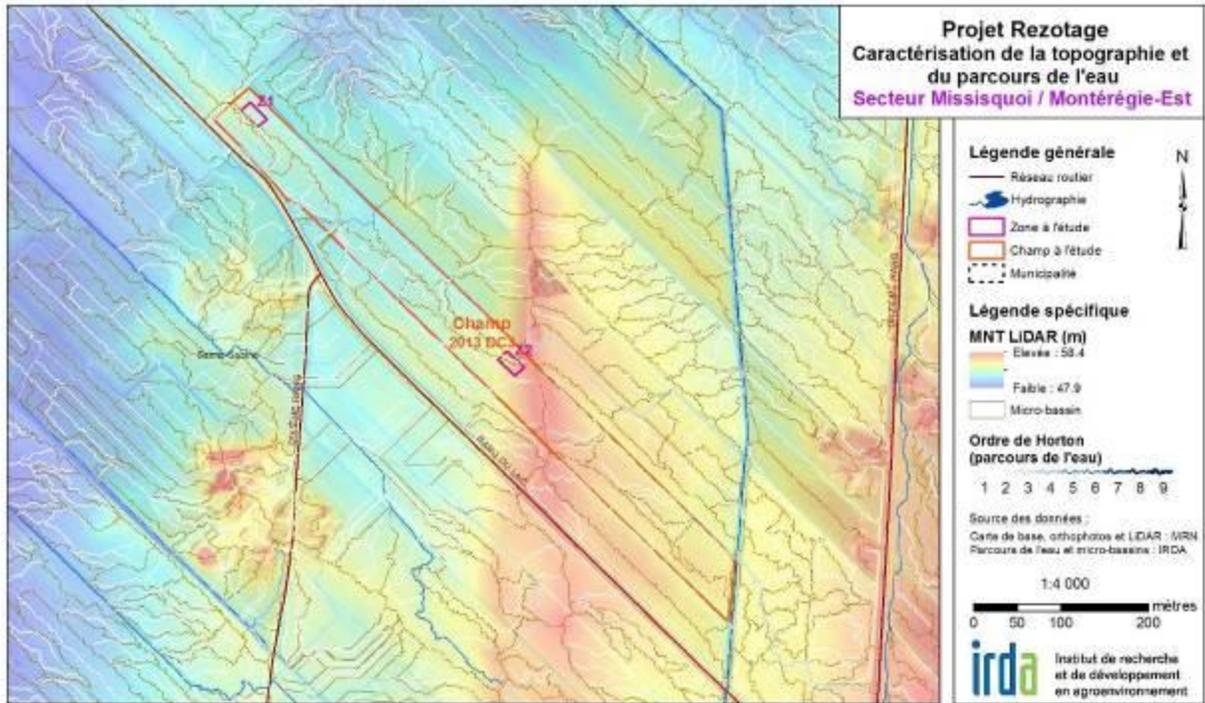


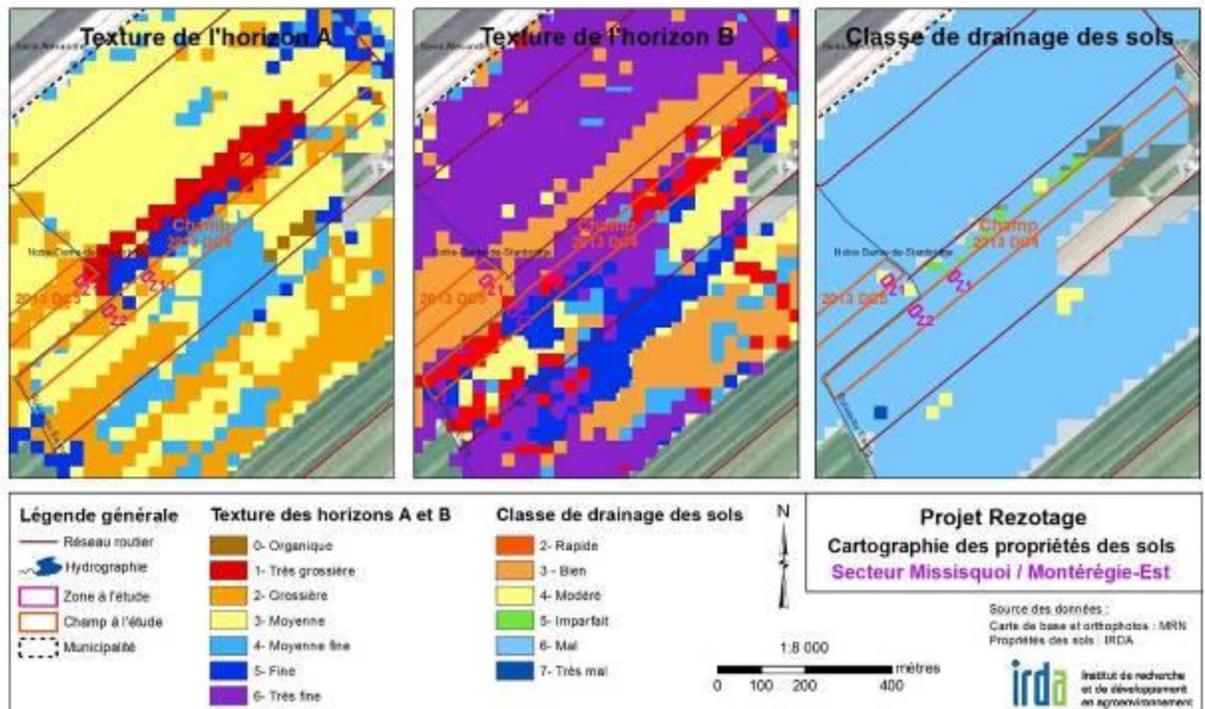
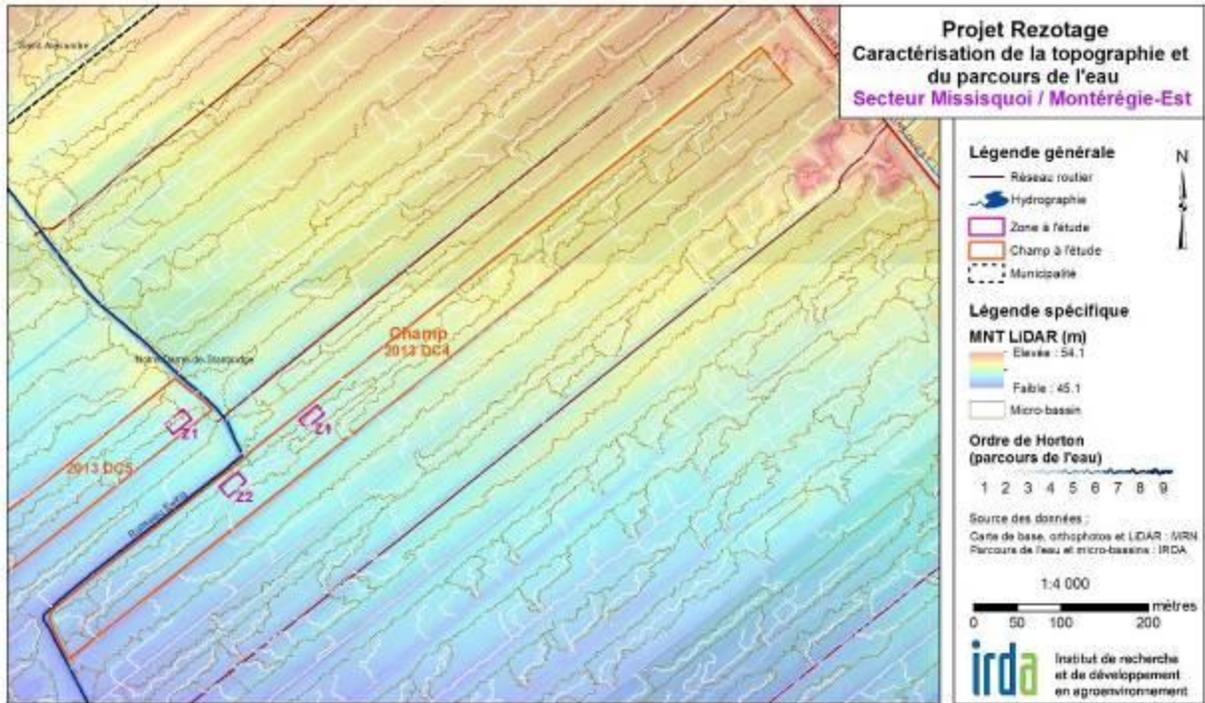


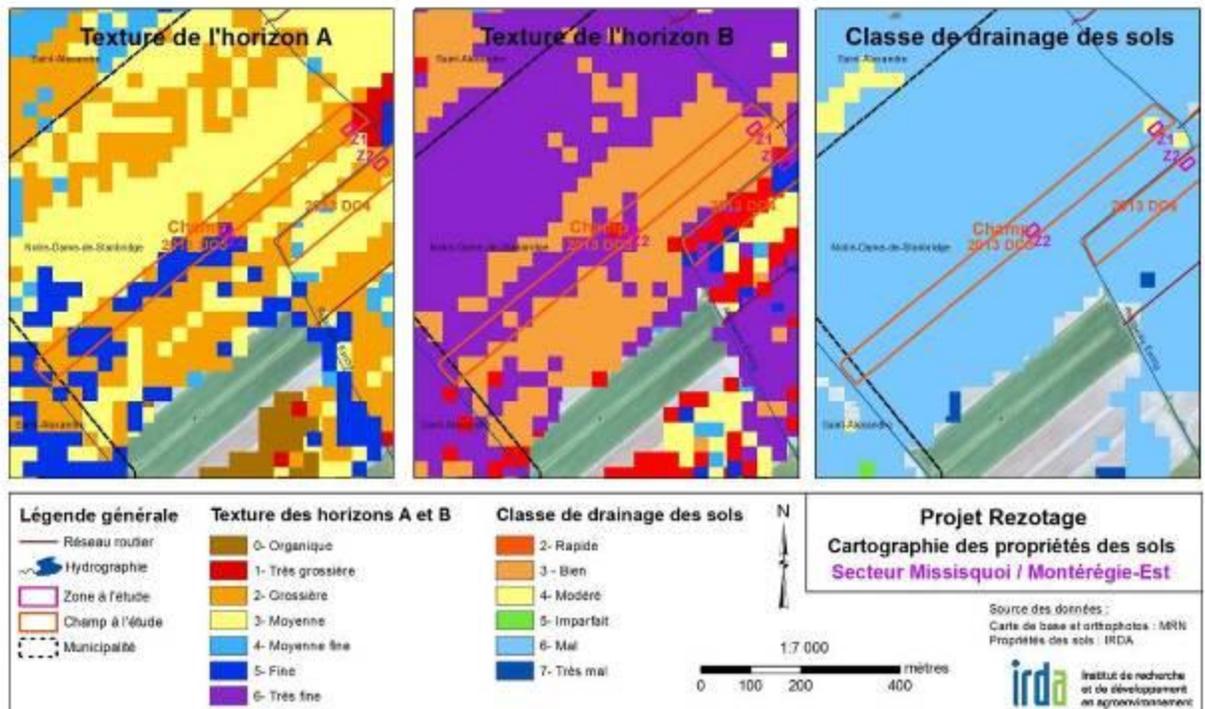
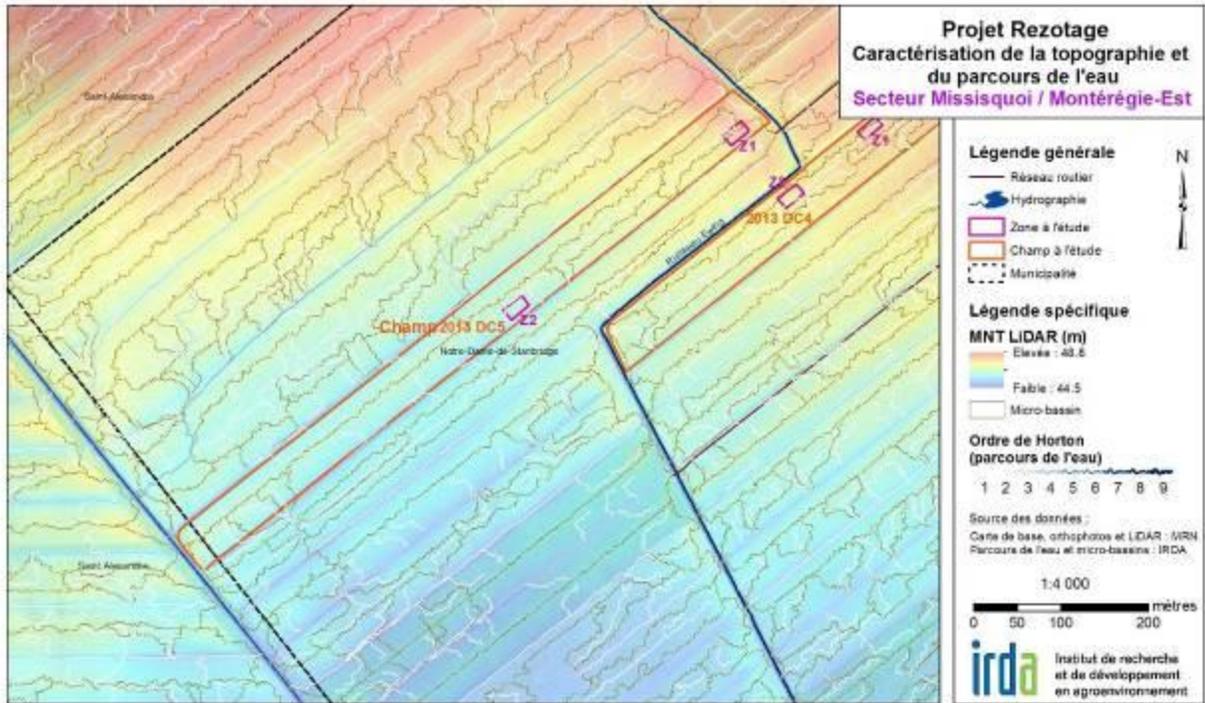




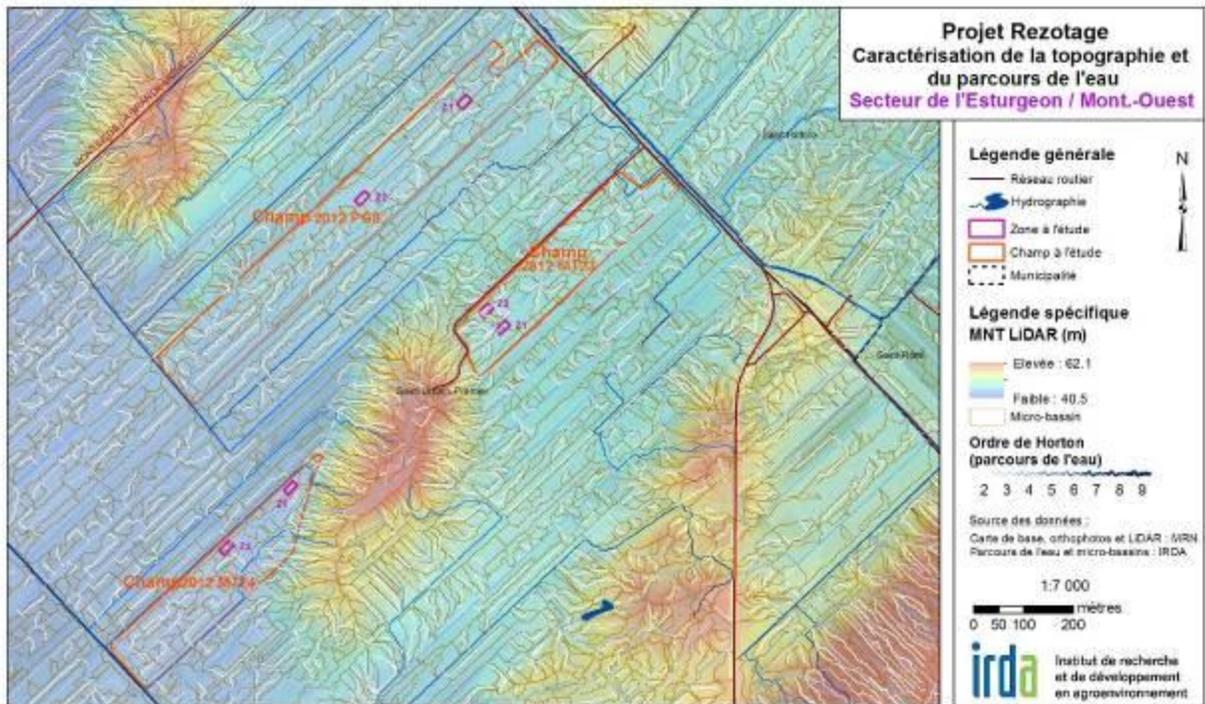
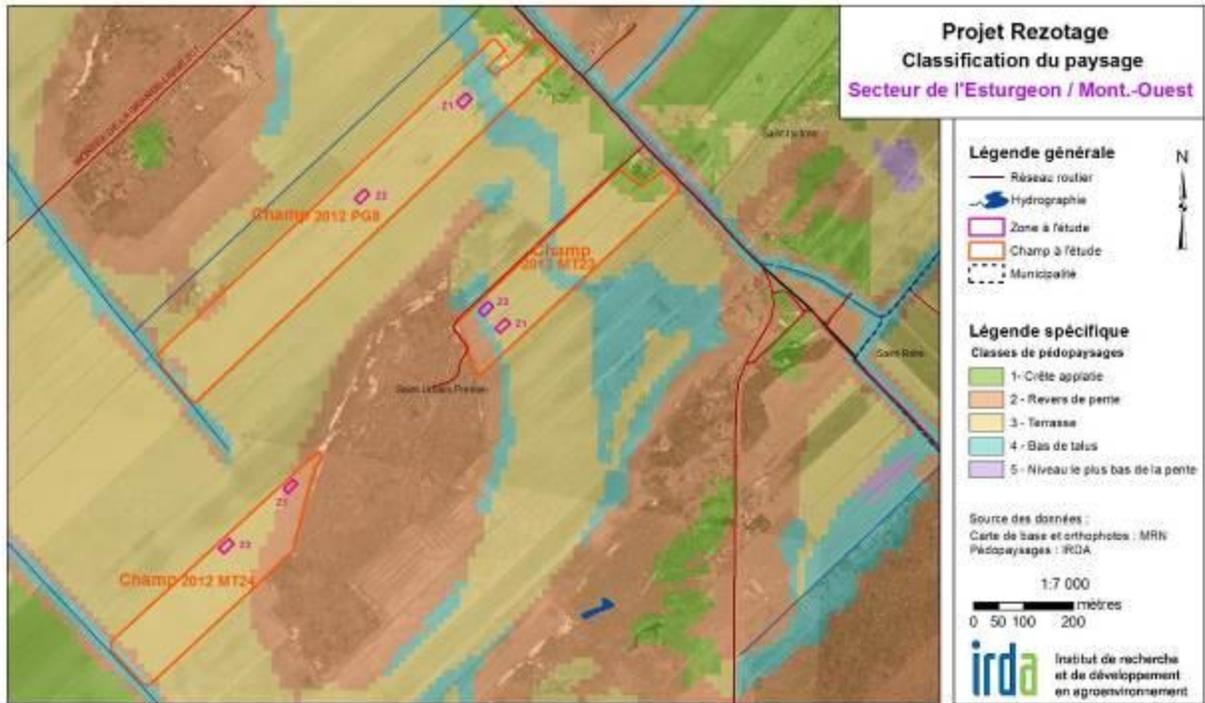


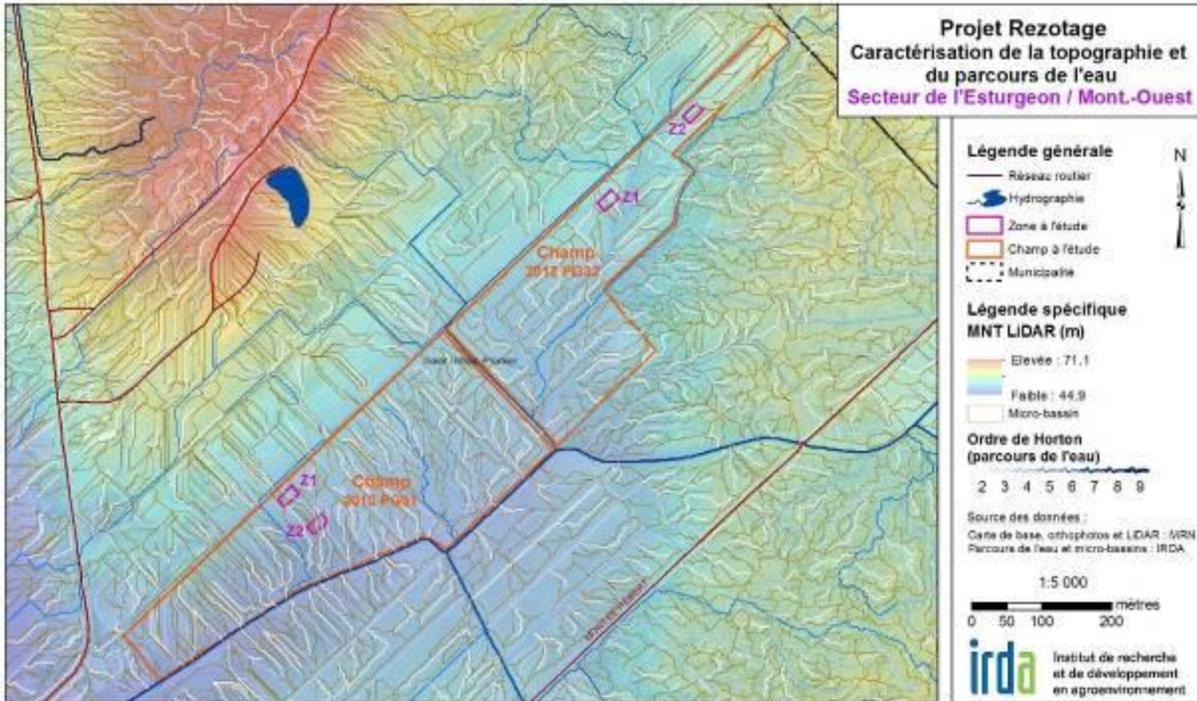
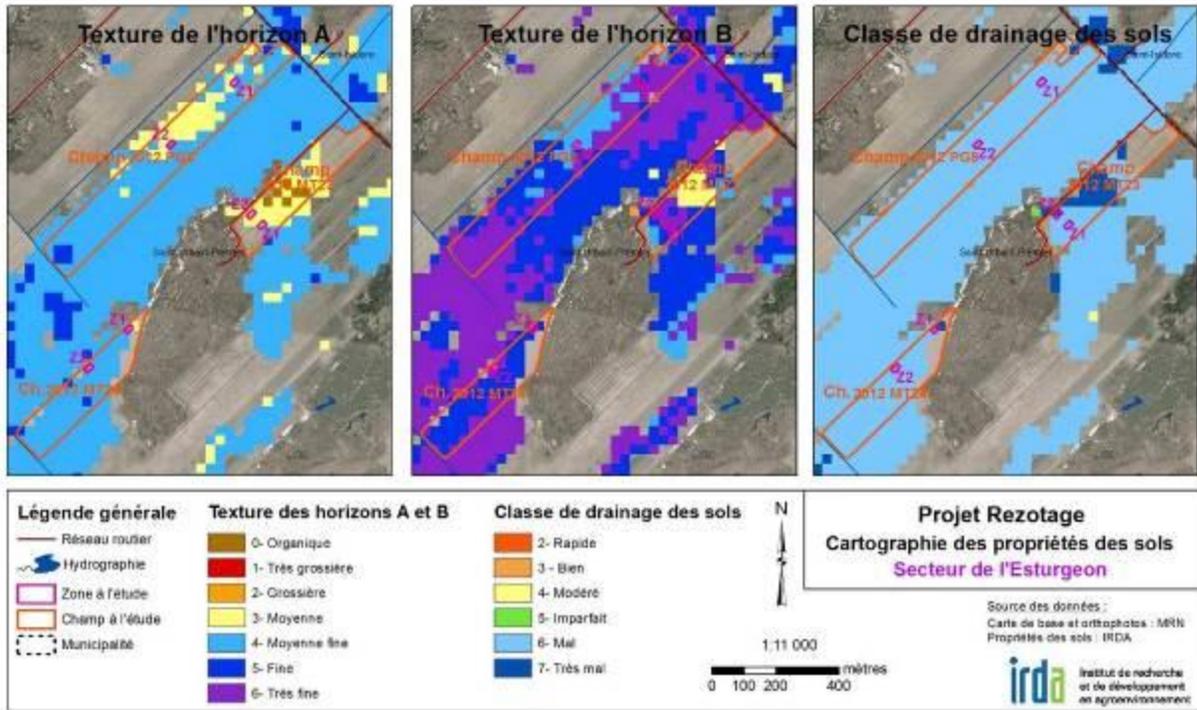


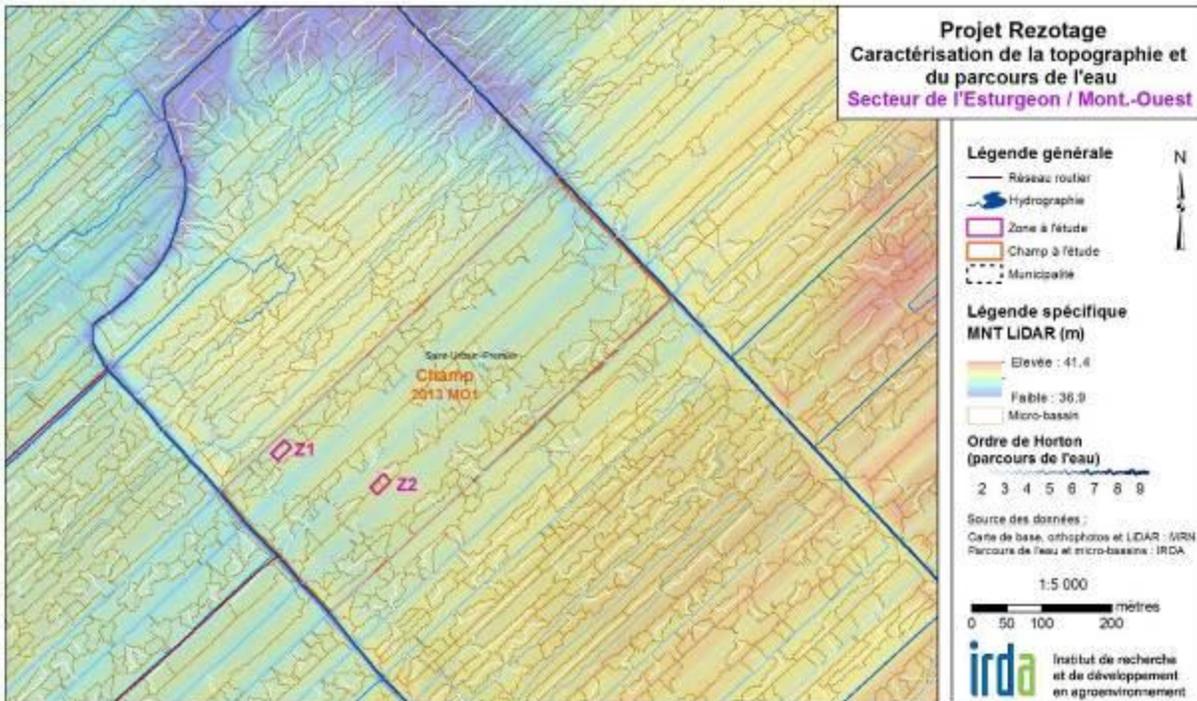
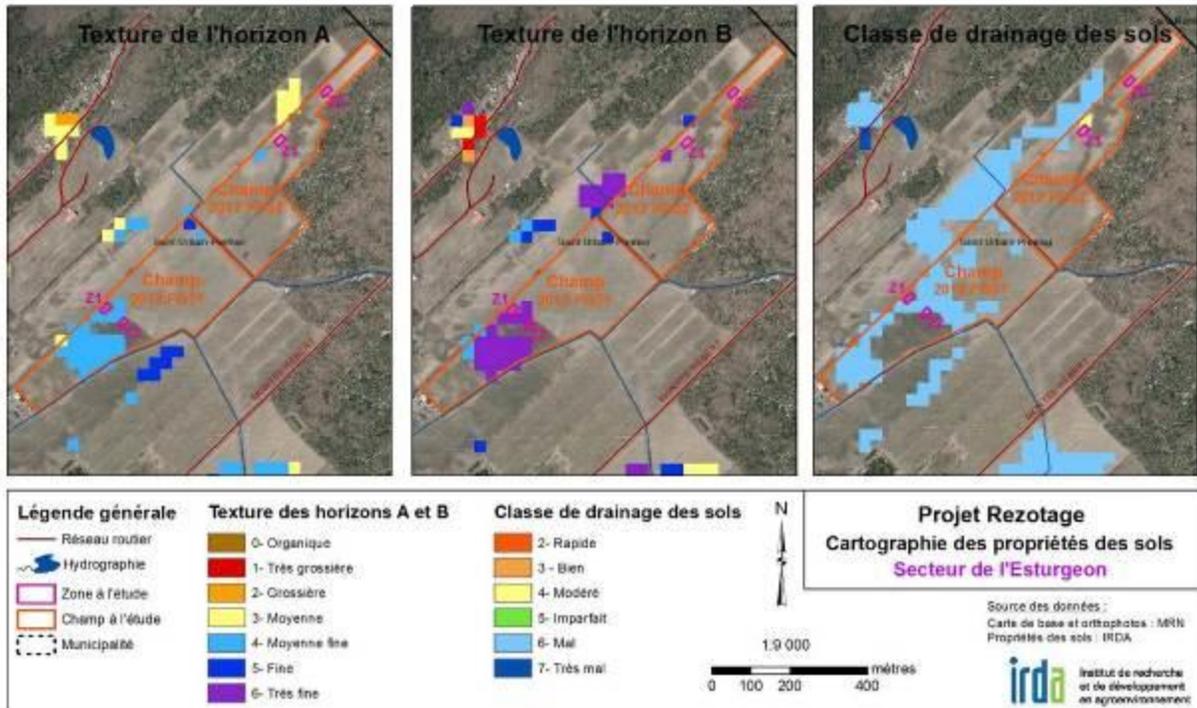


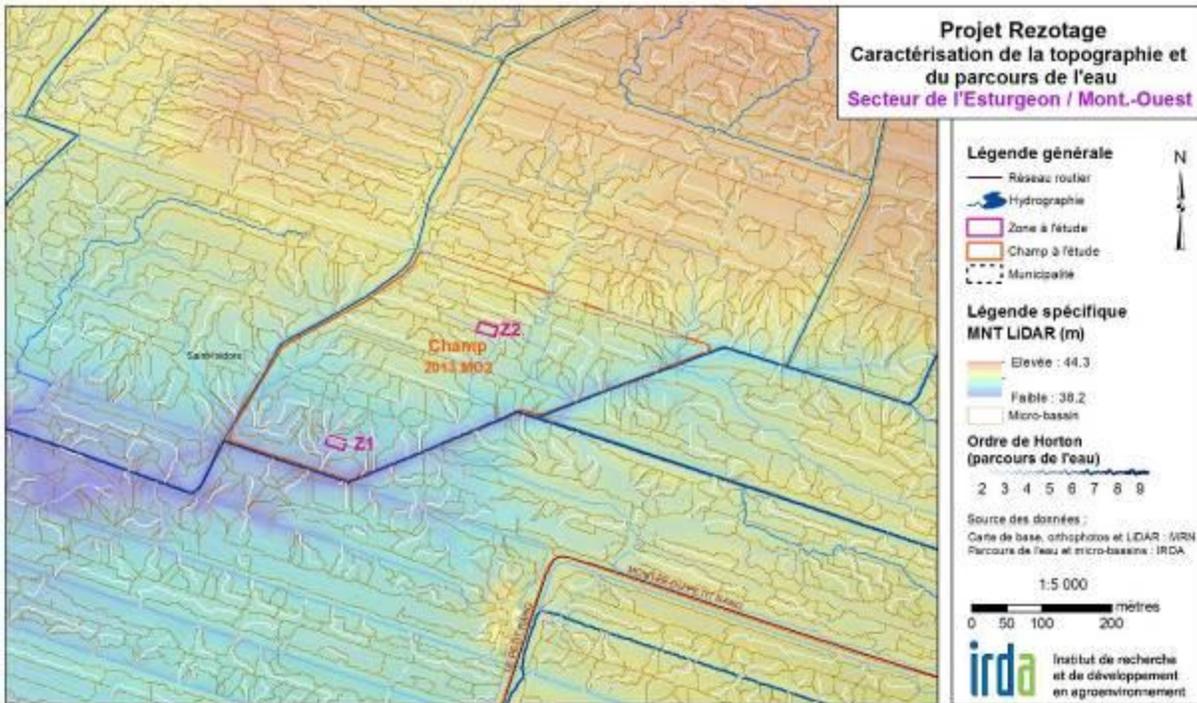
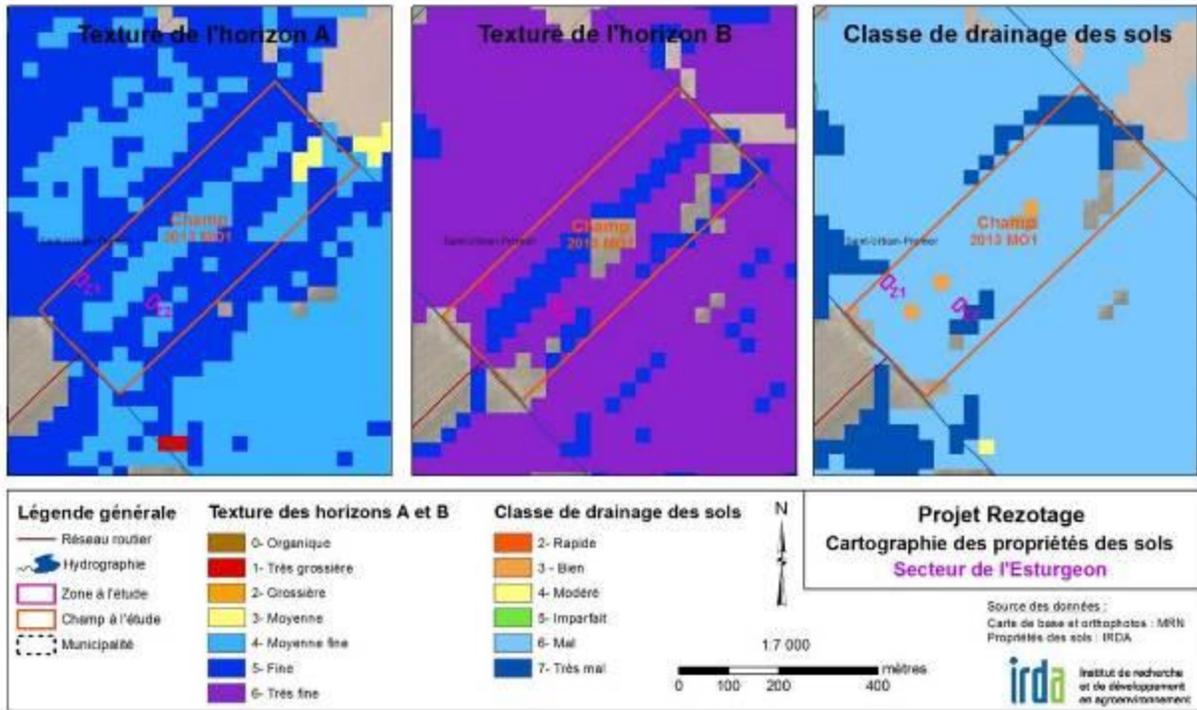


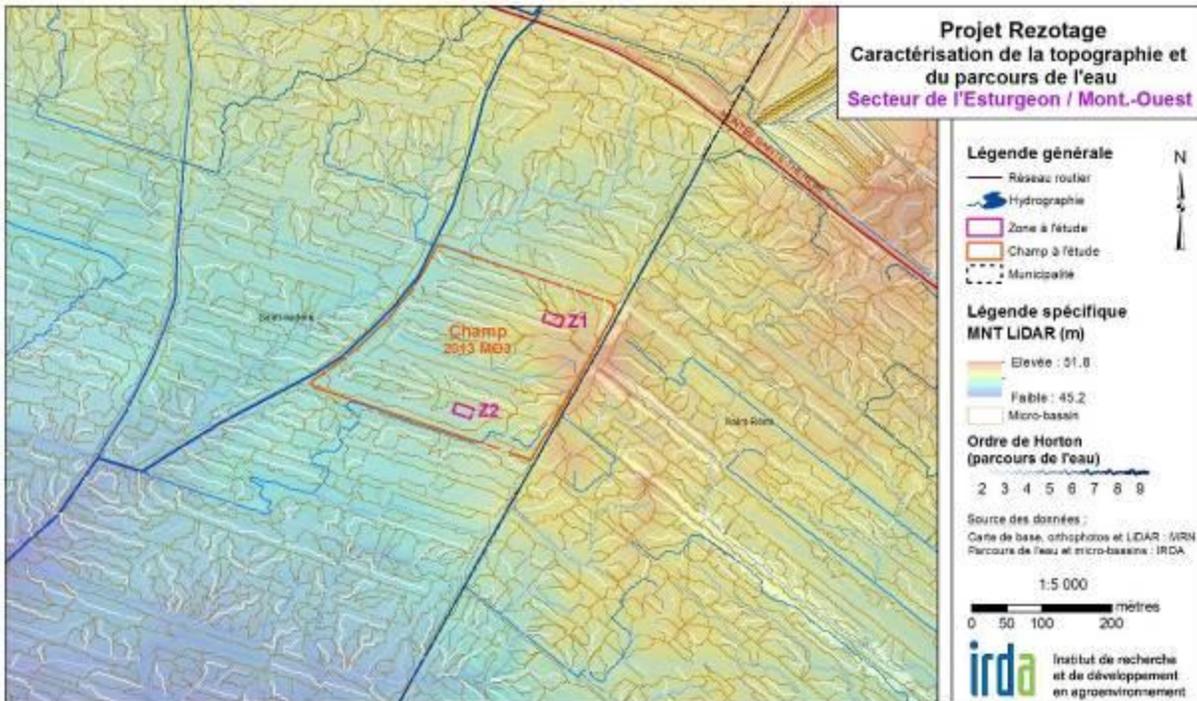
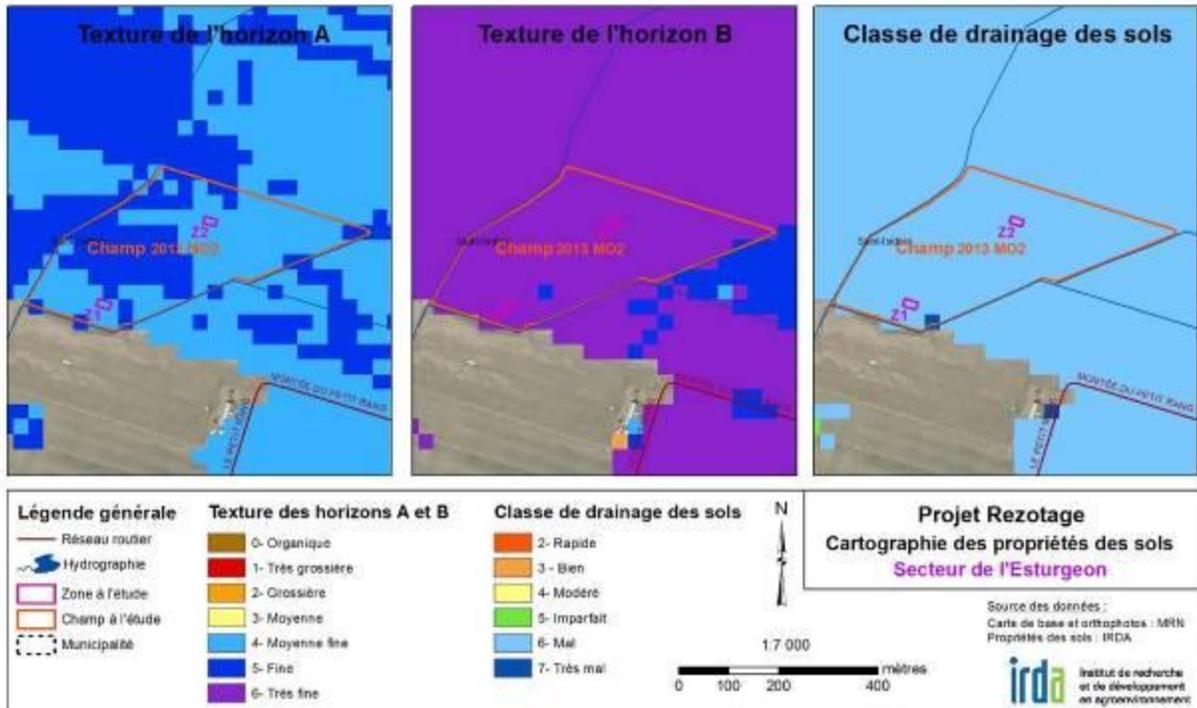
## Secteur de l'Esturgeon / Montérégie- Ouest

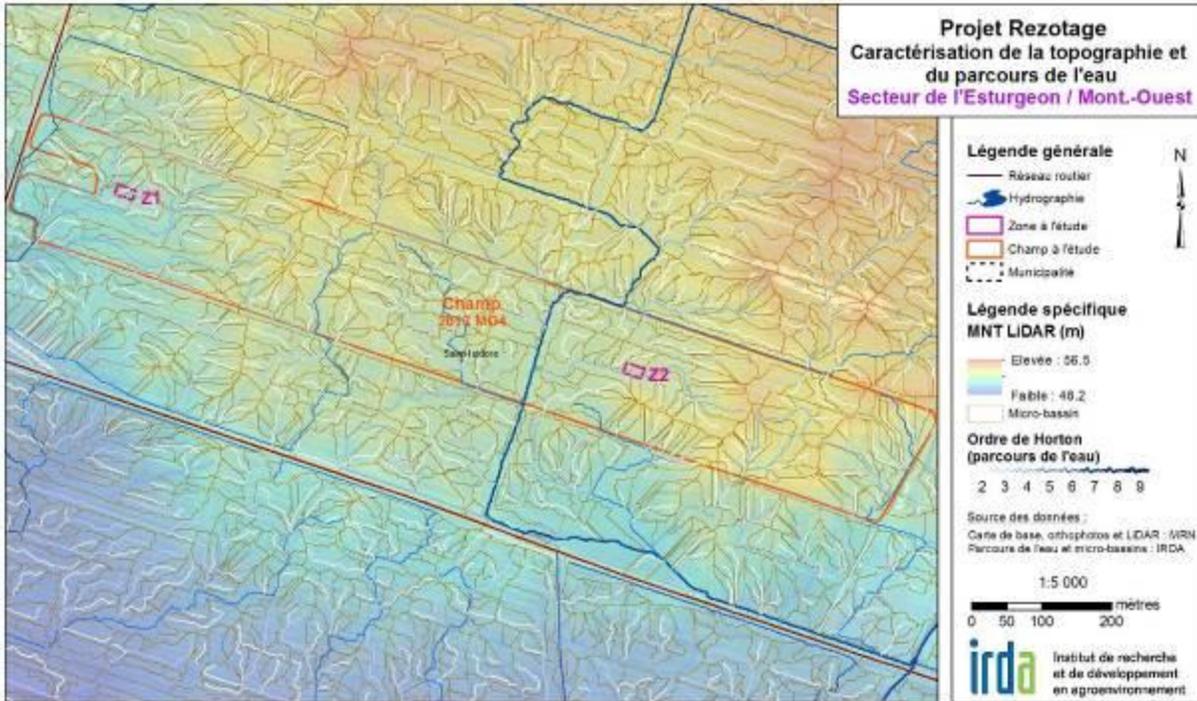
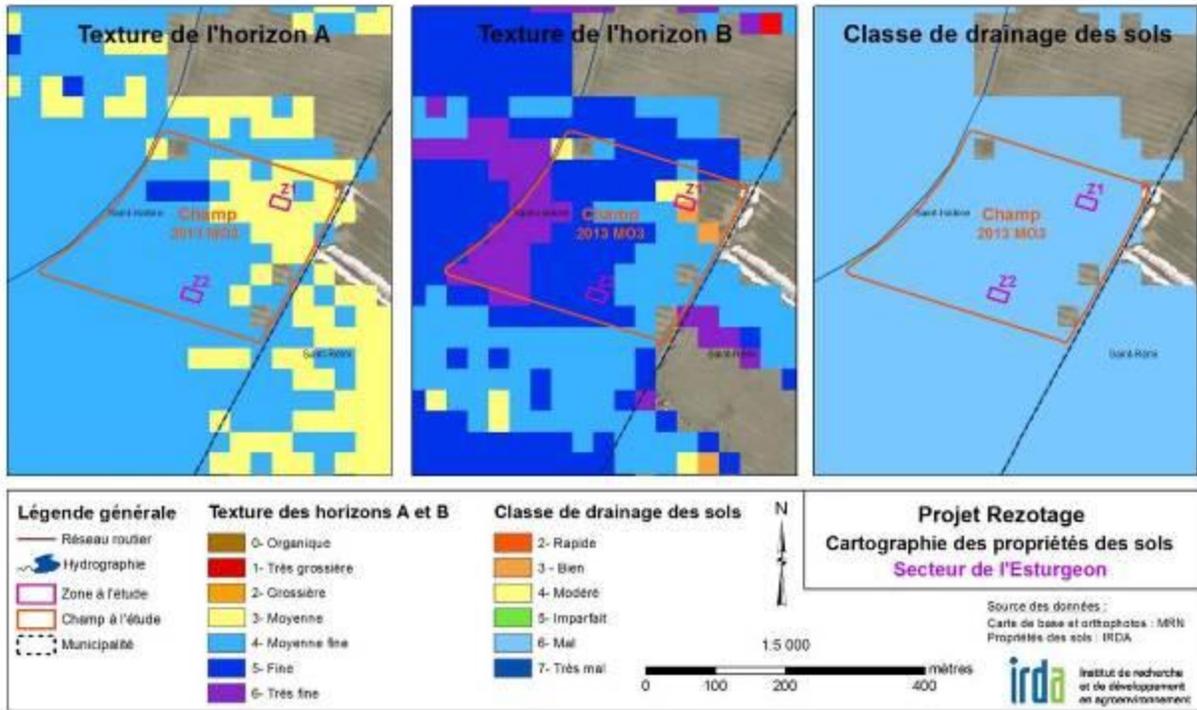


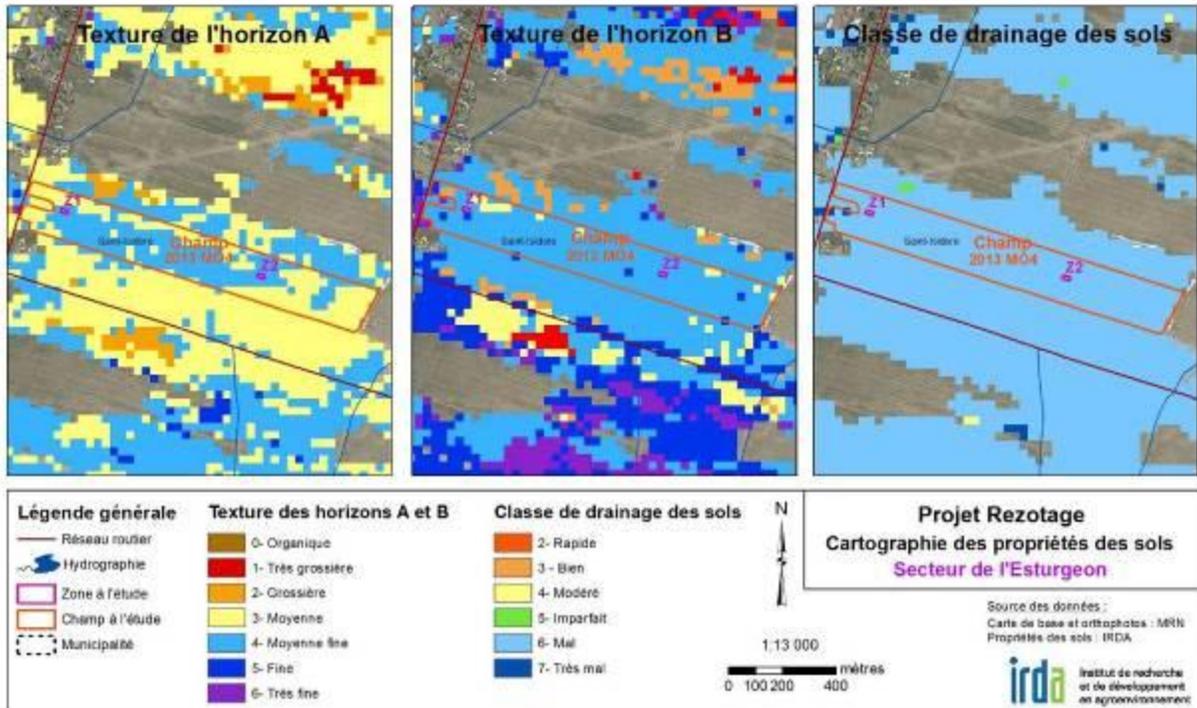


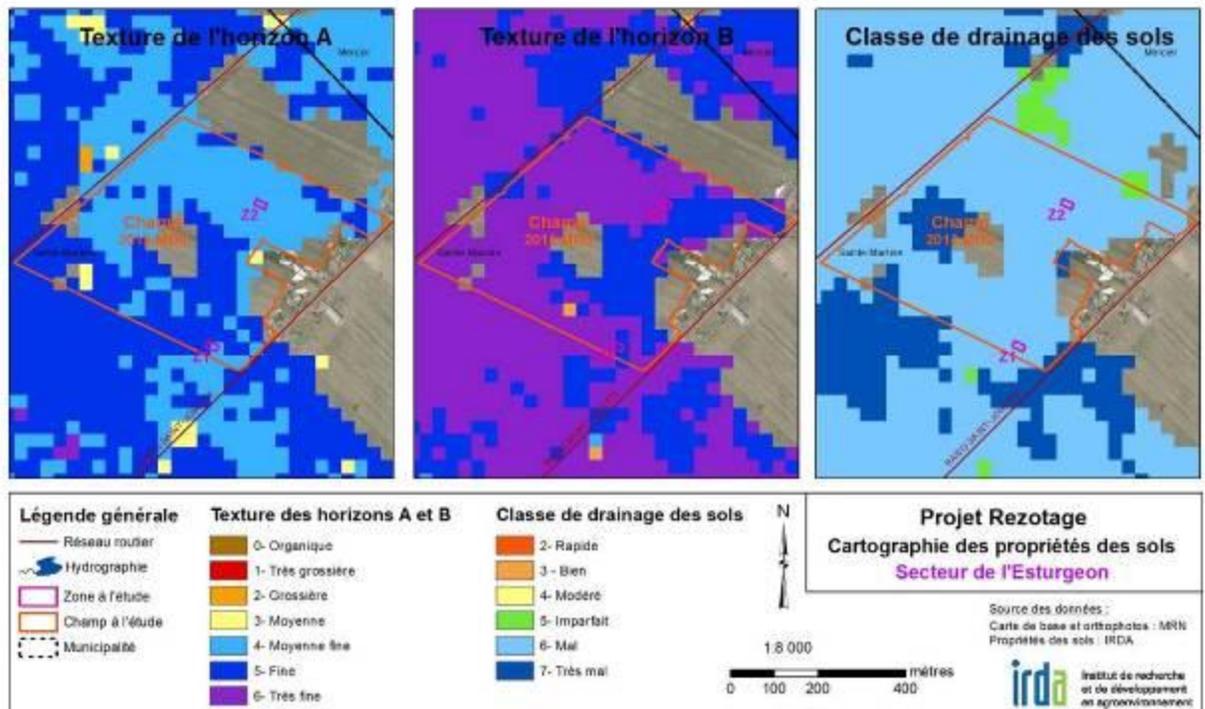
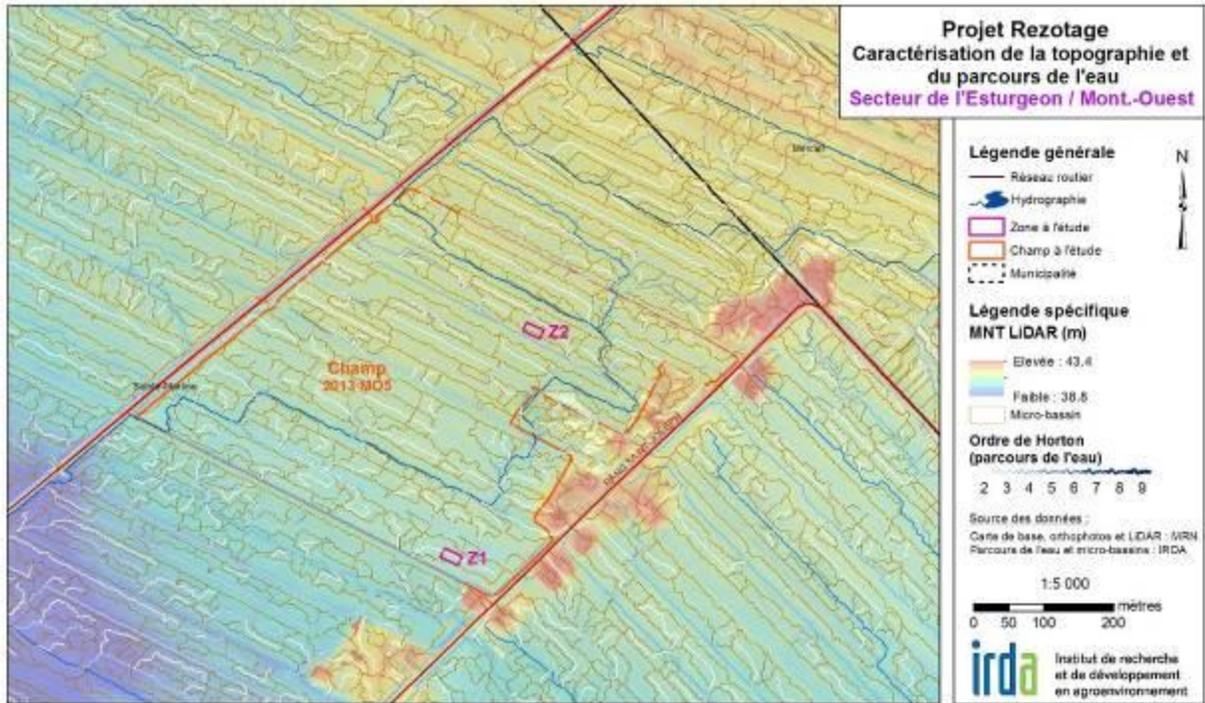






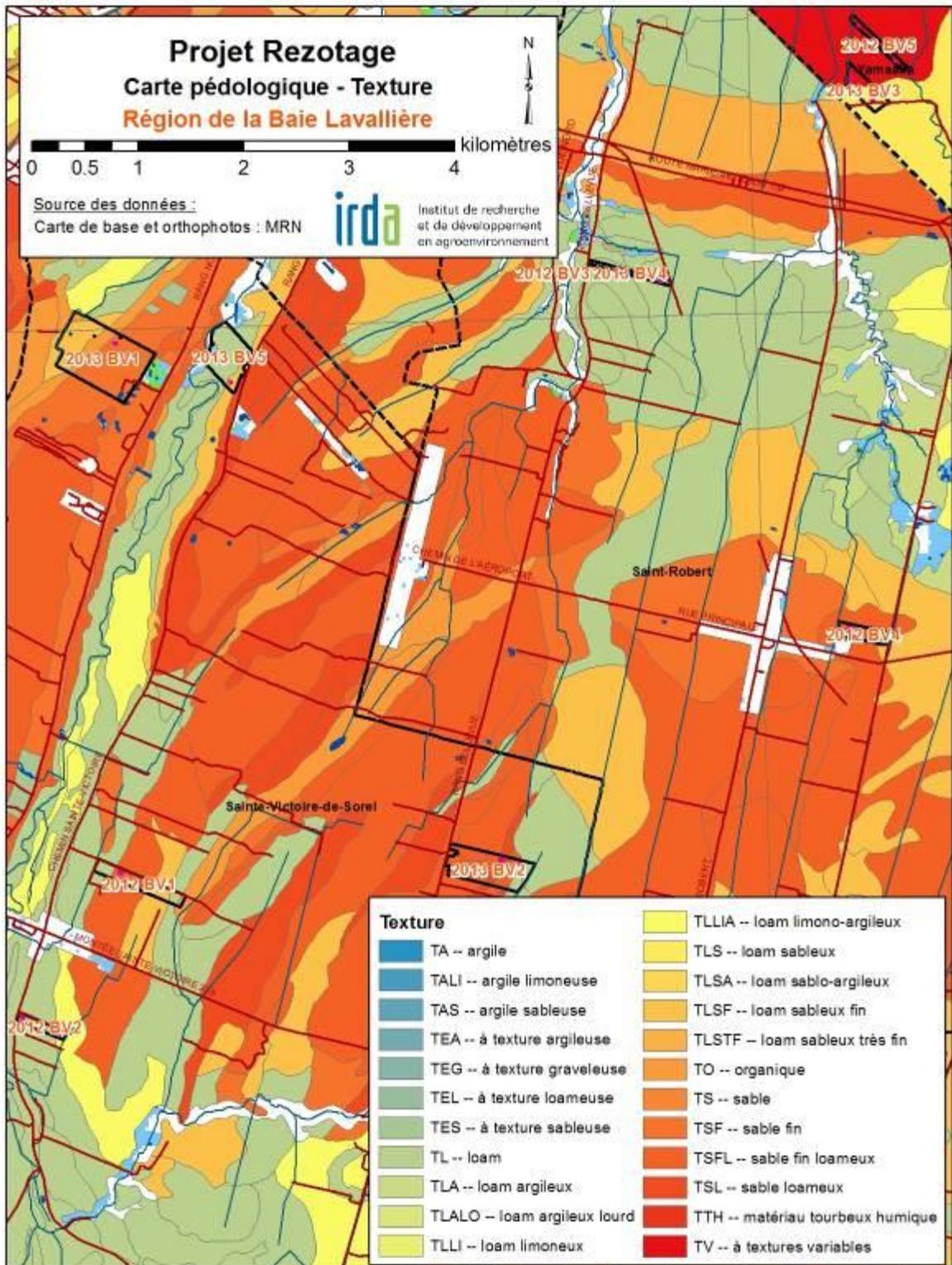


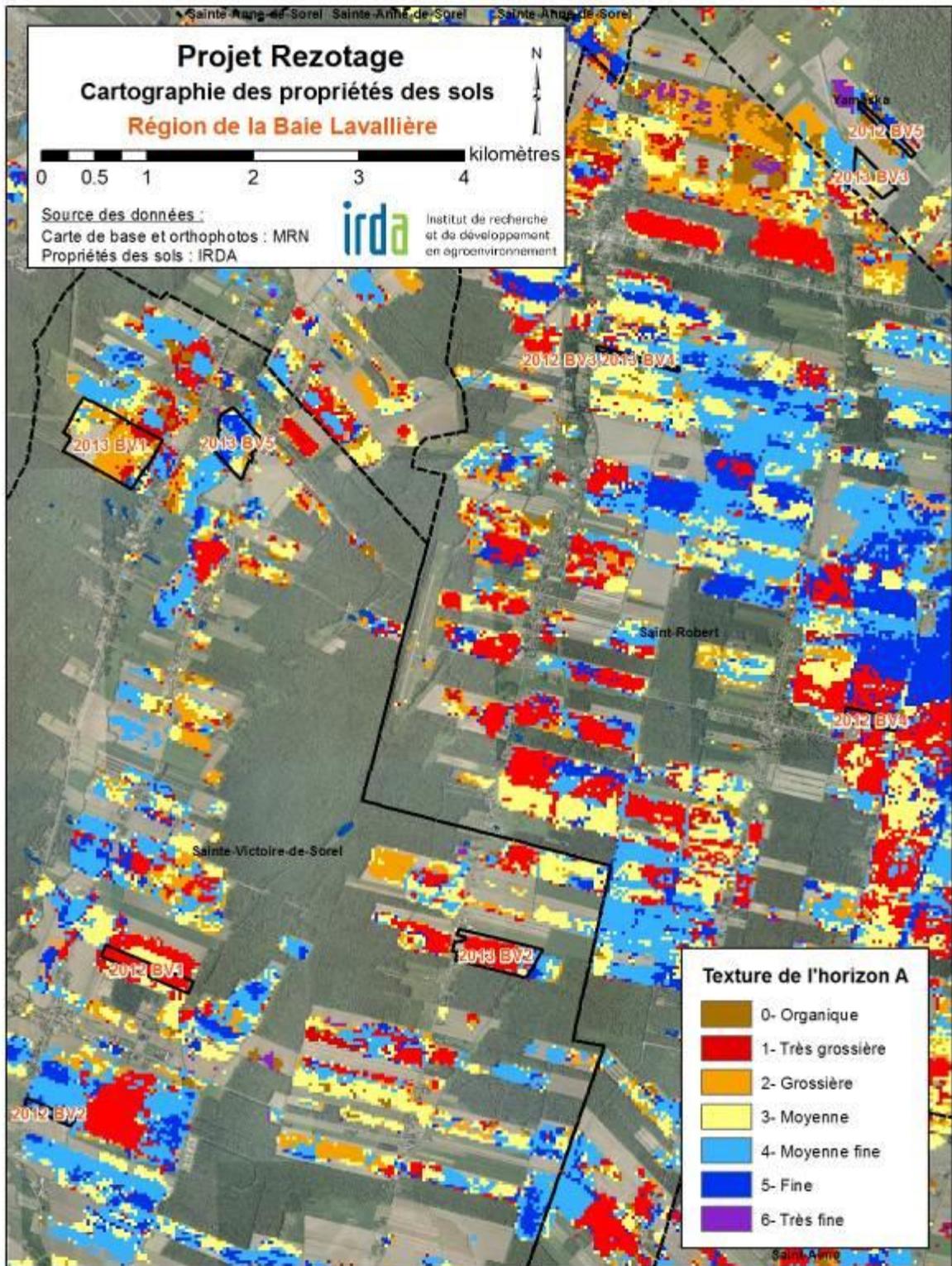


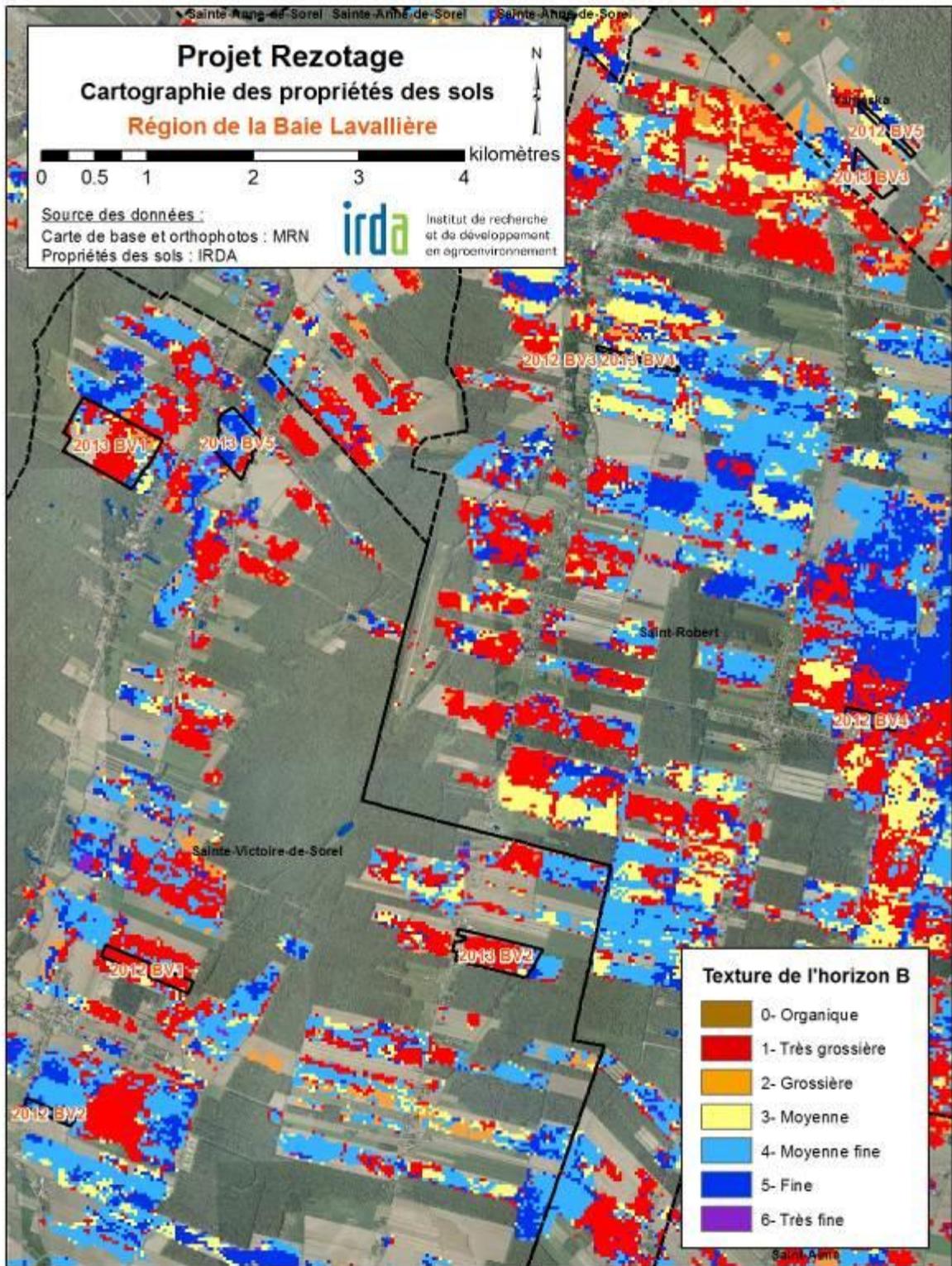


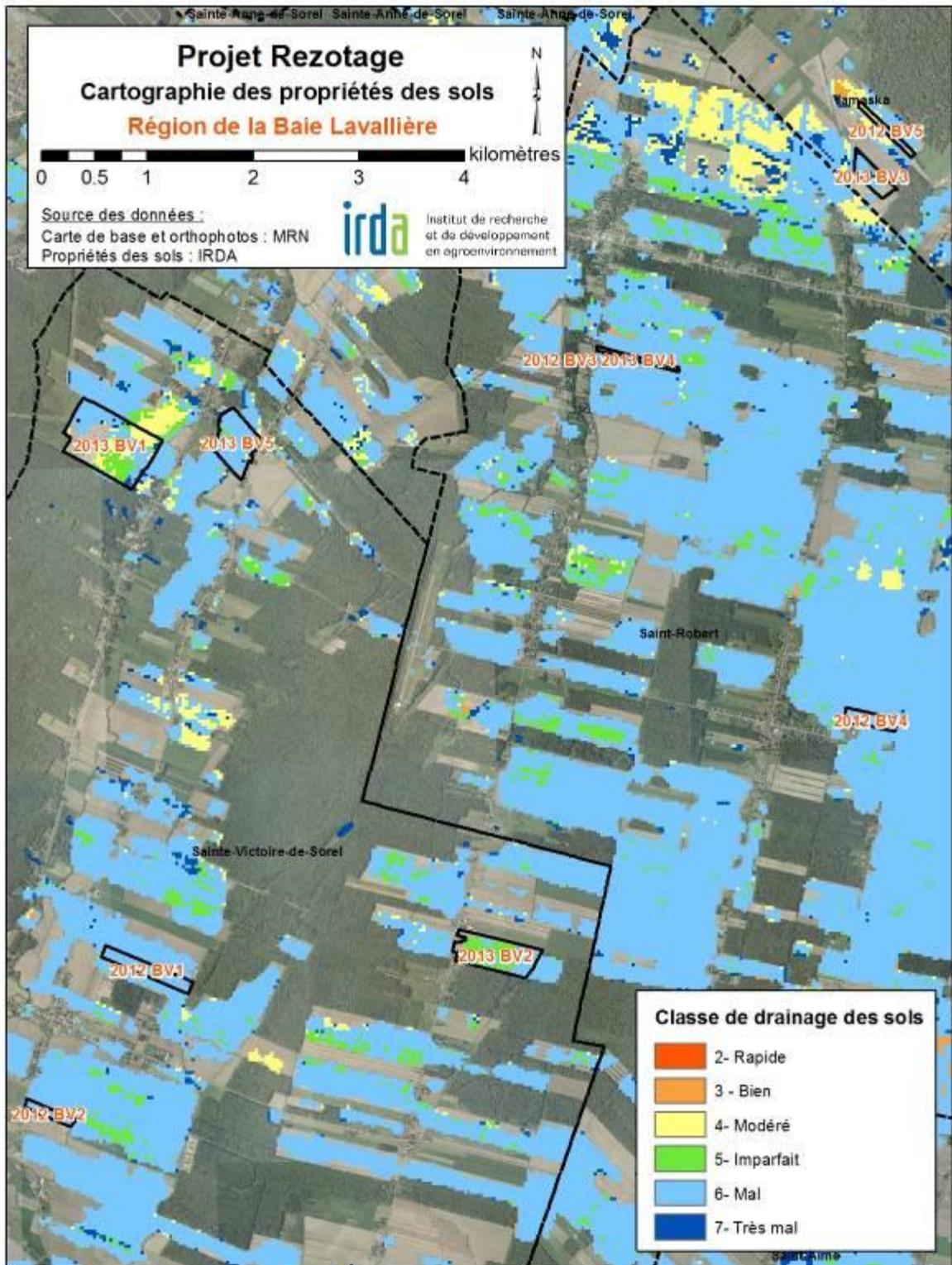
## Annexe 2 : Cartographie moyenne résolution (1:20 000) (échelle régionale)

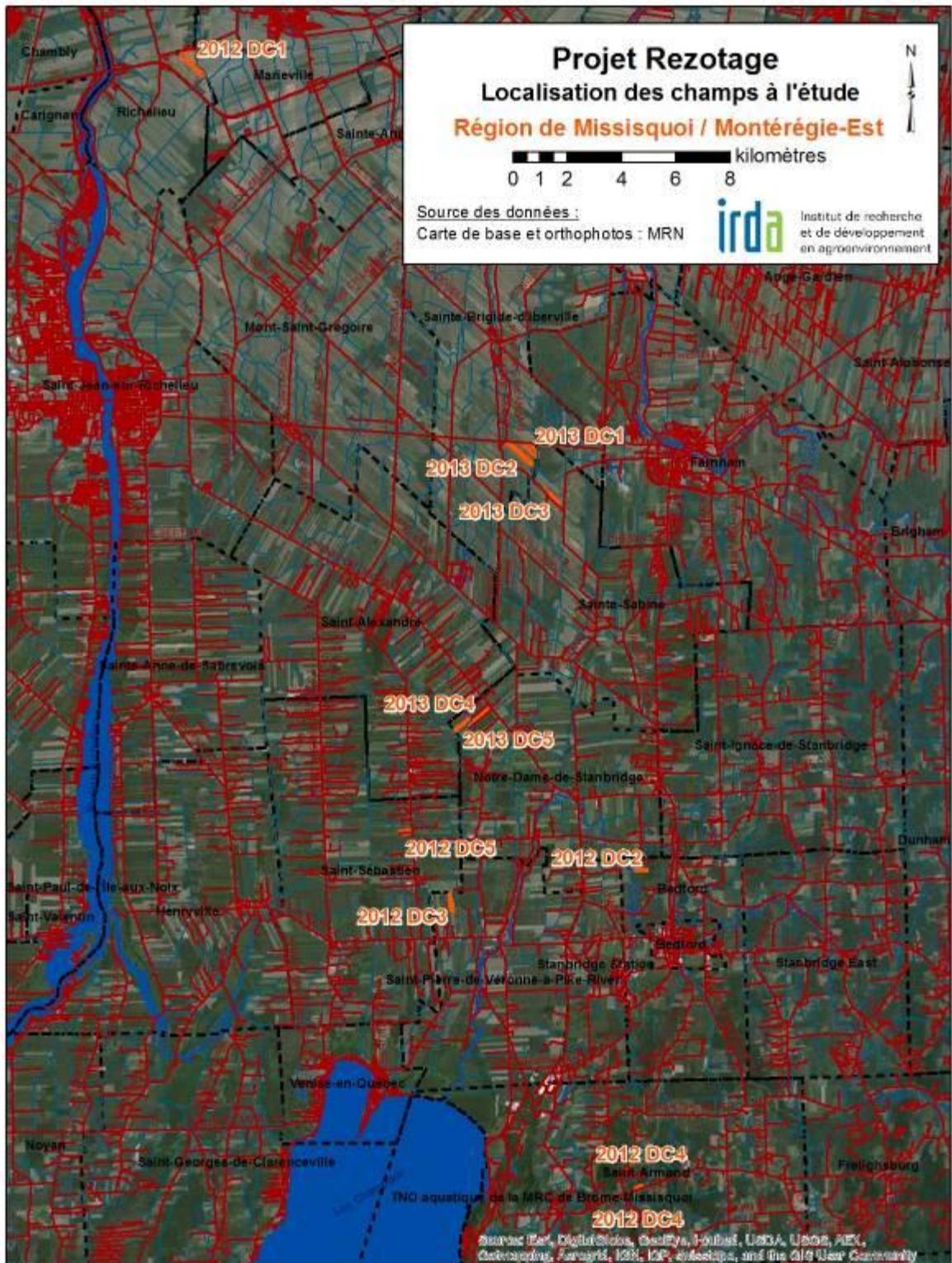


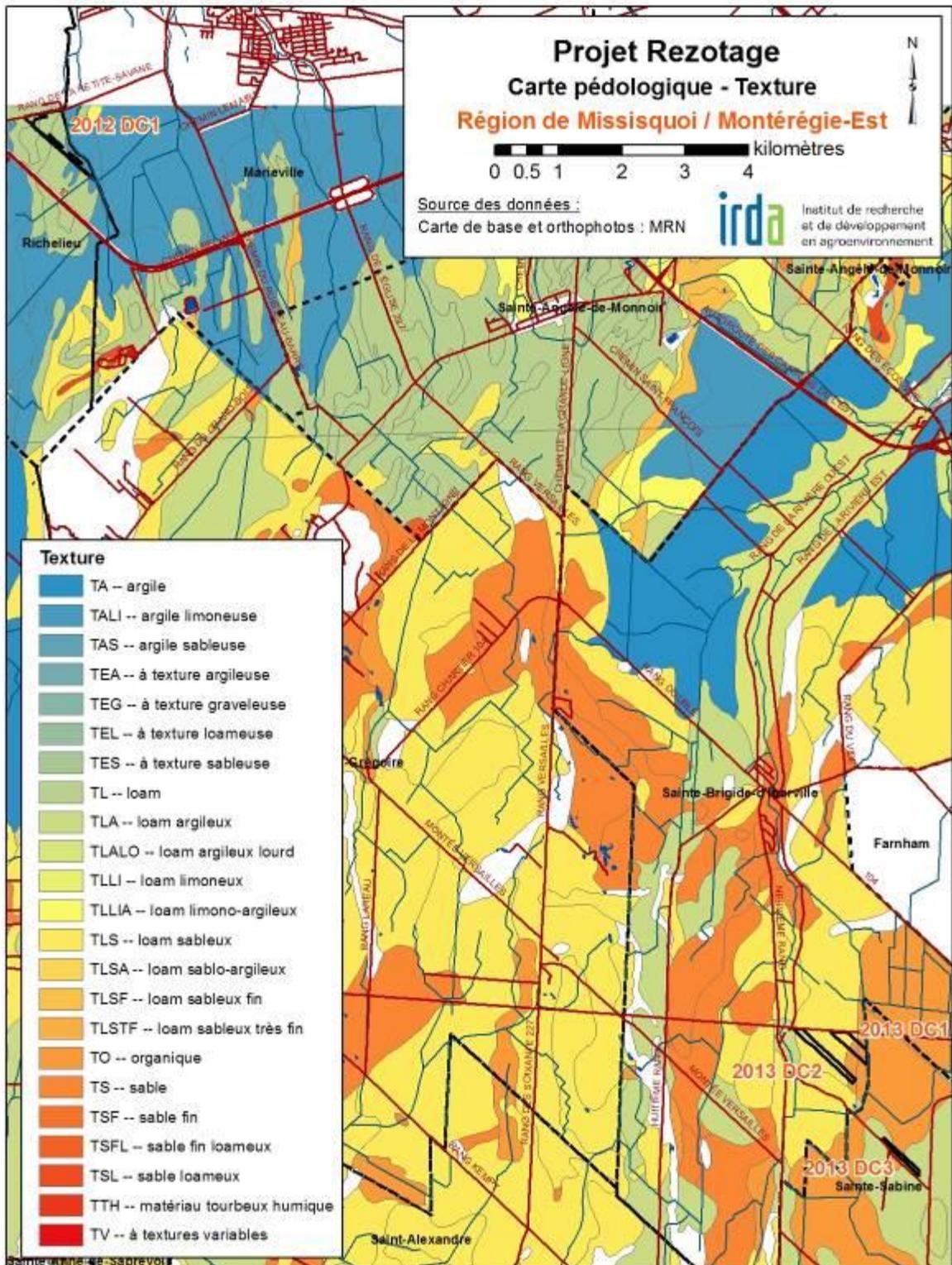


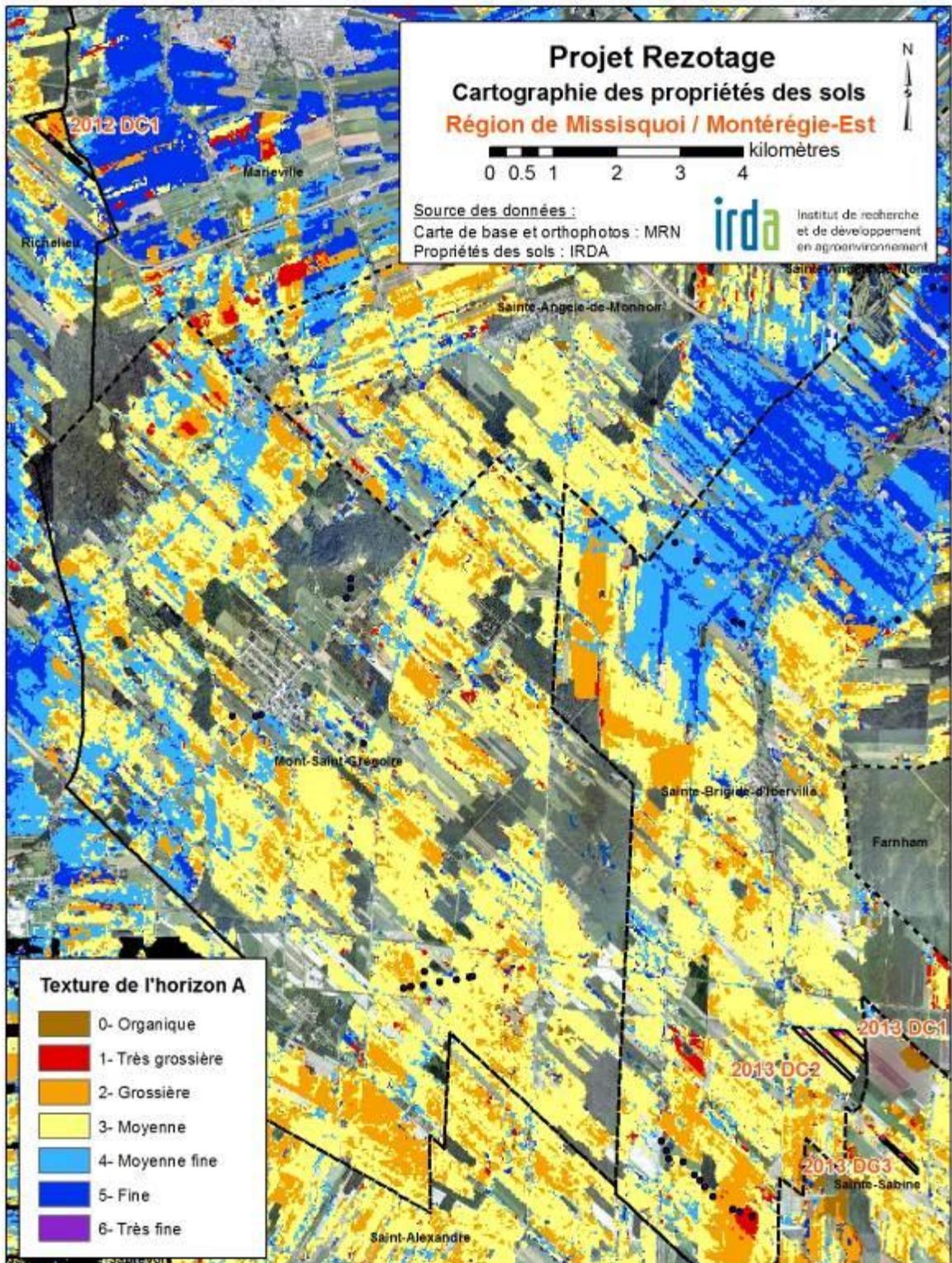


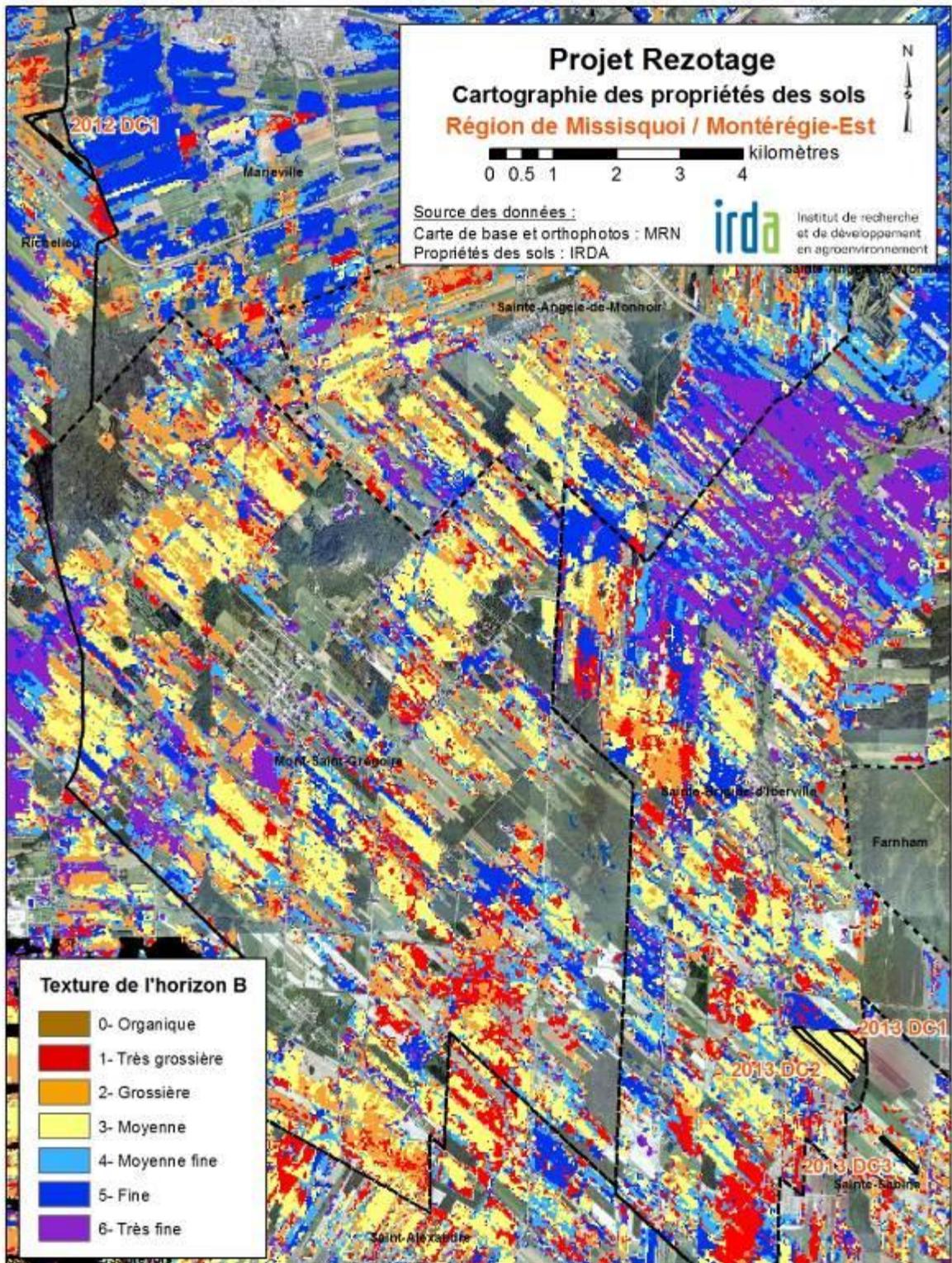


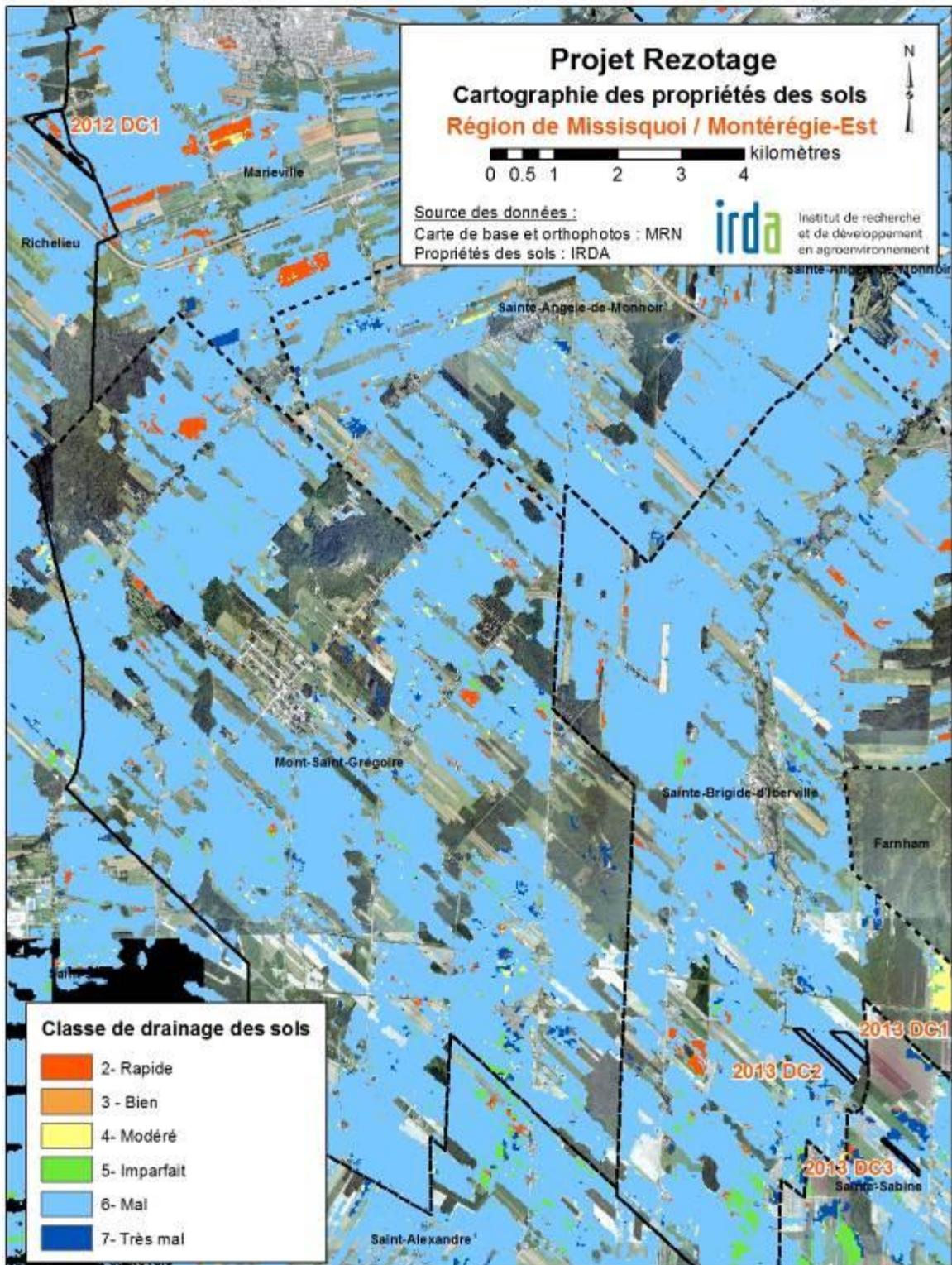


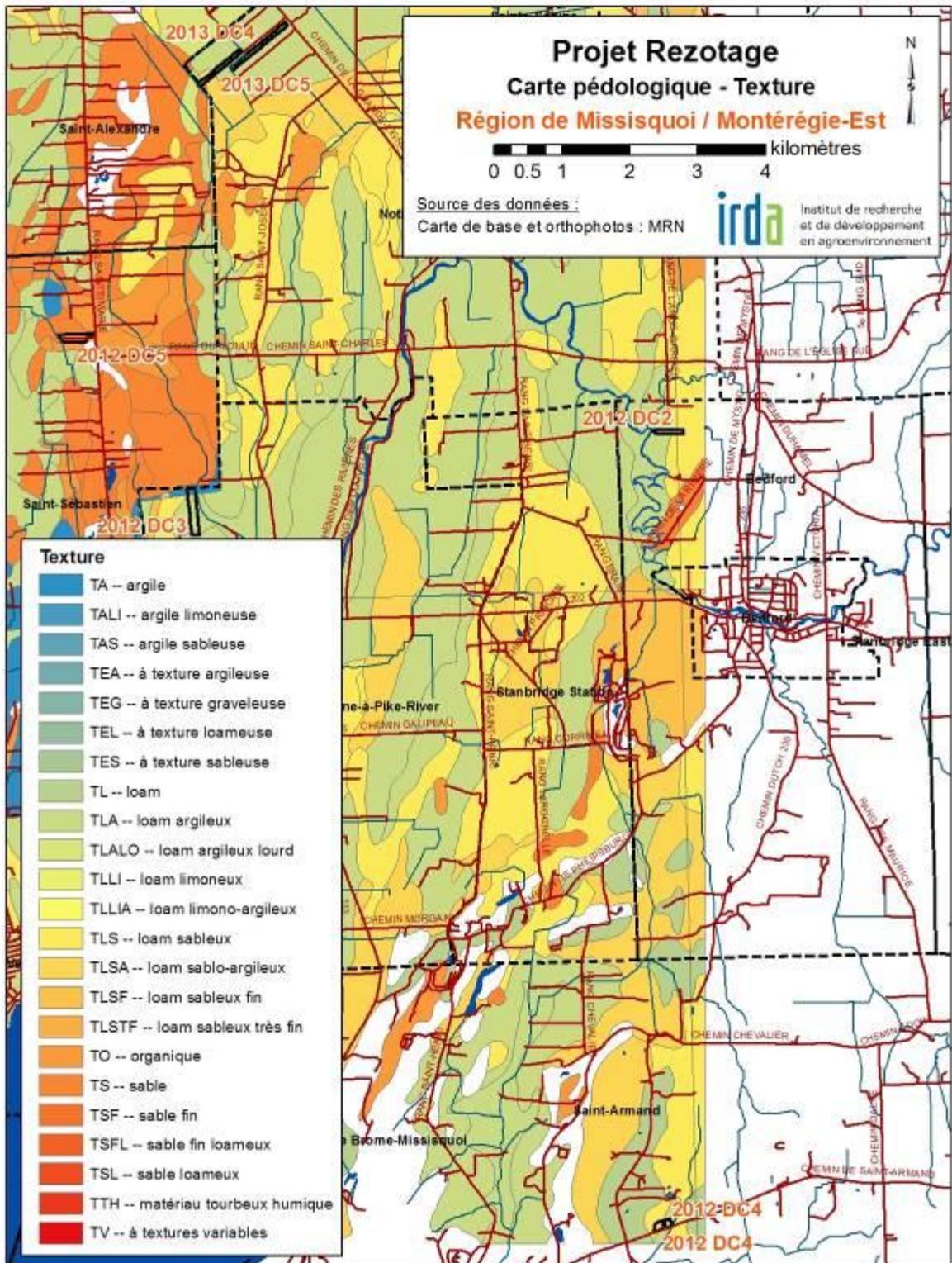


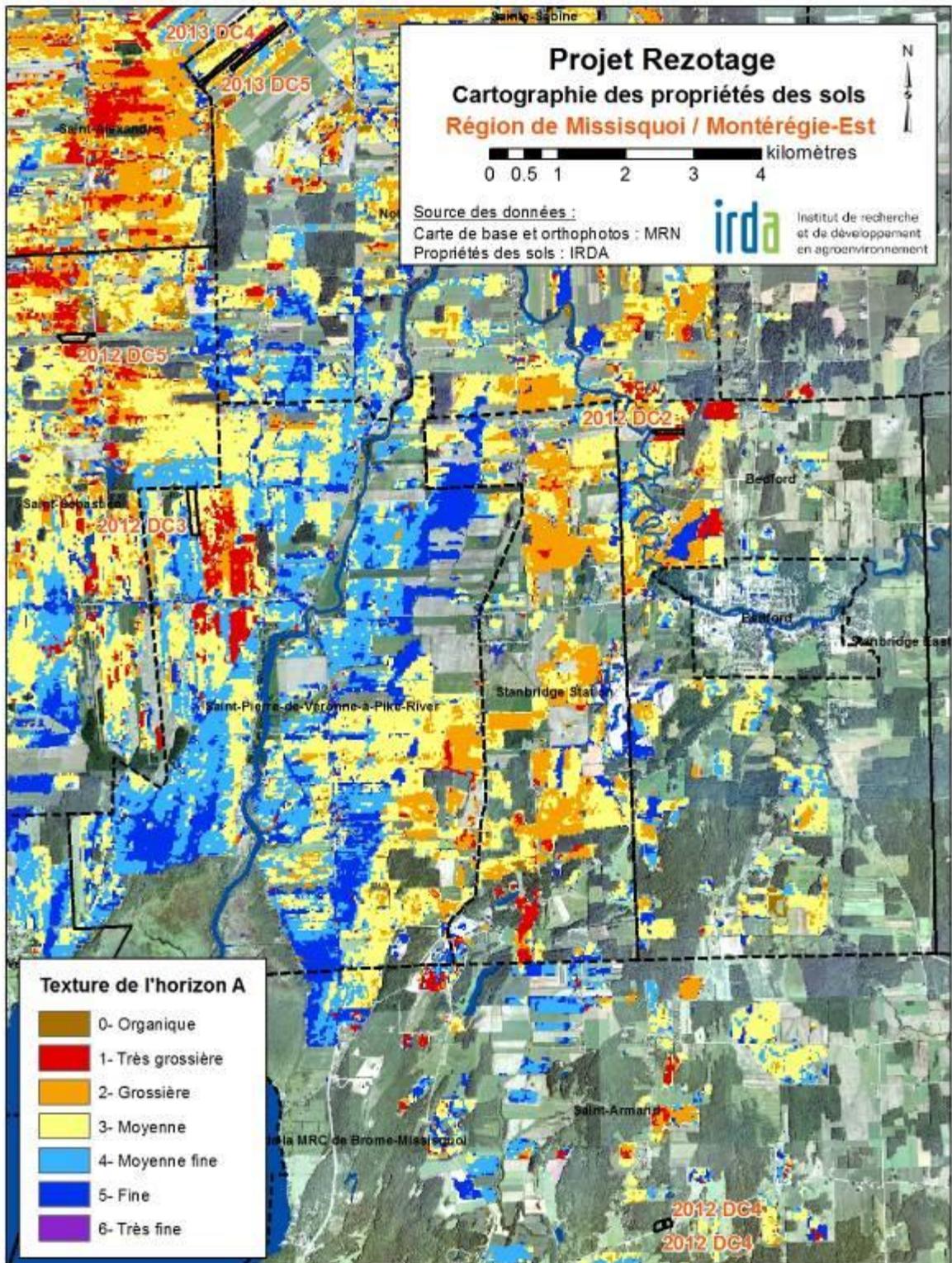


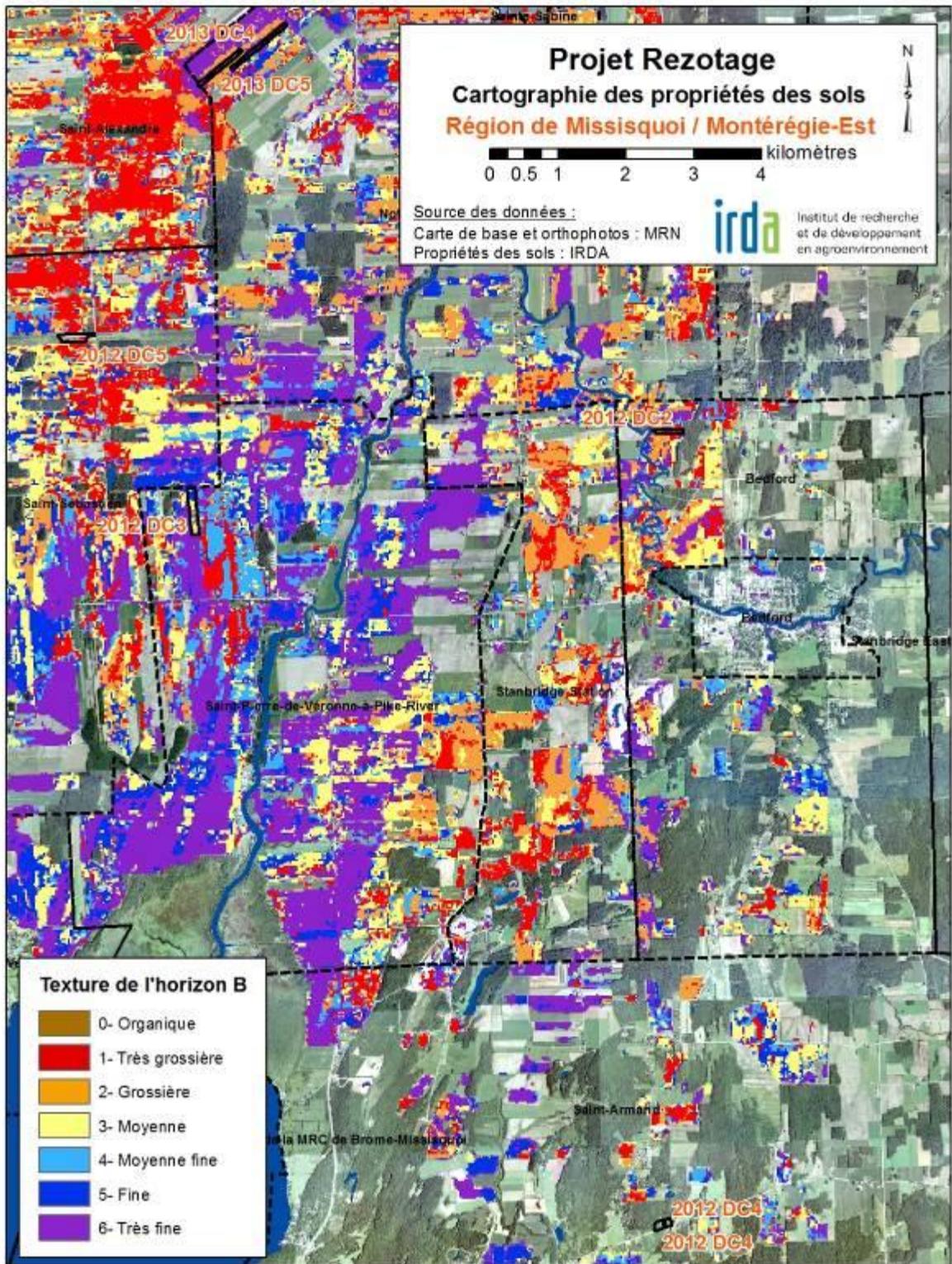


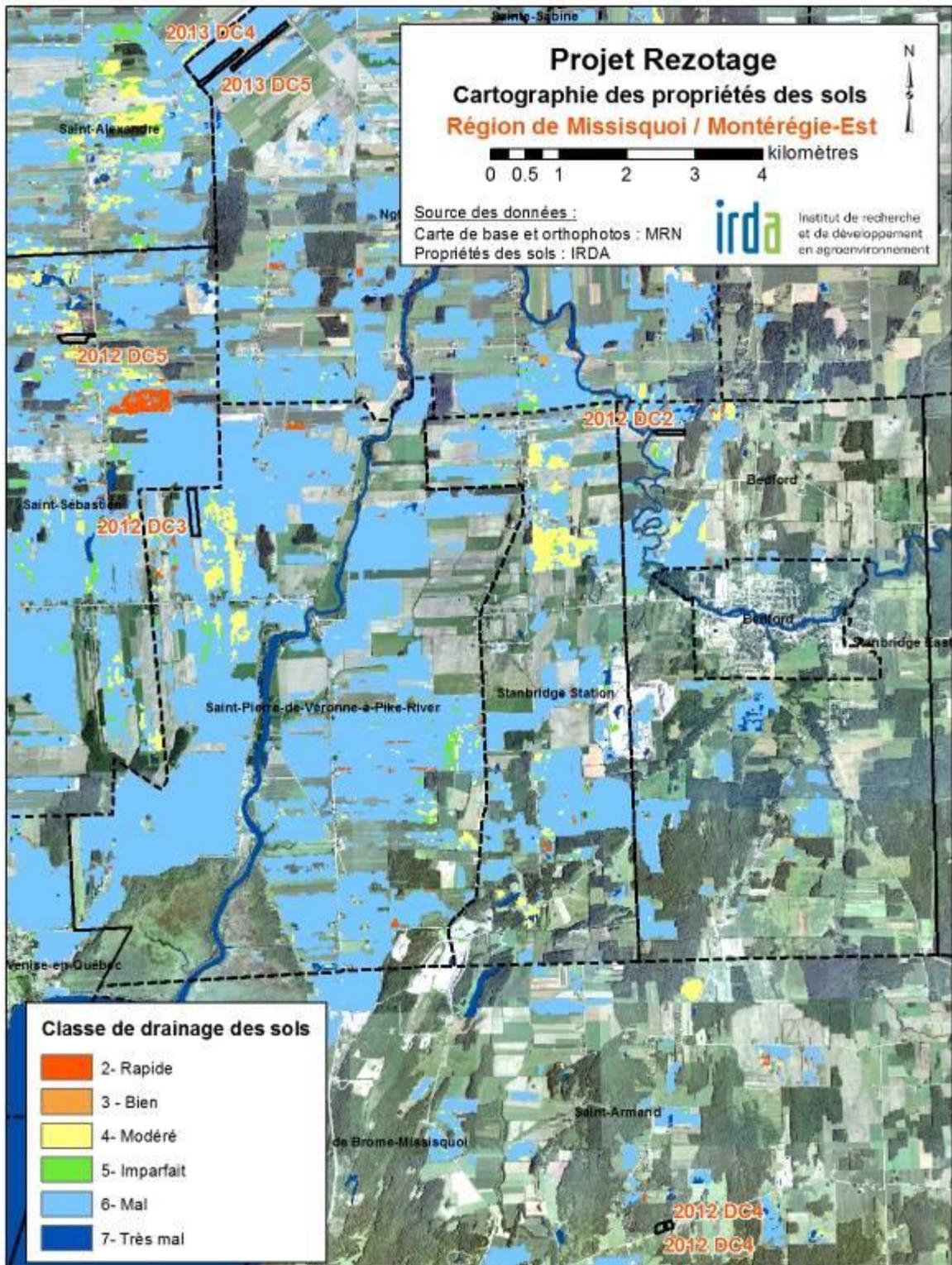


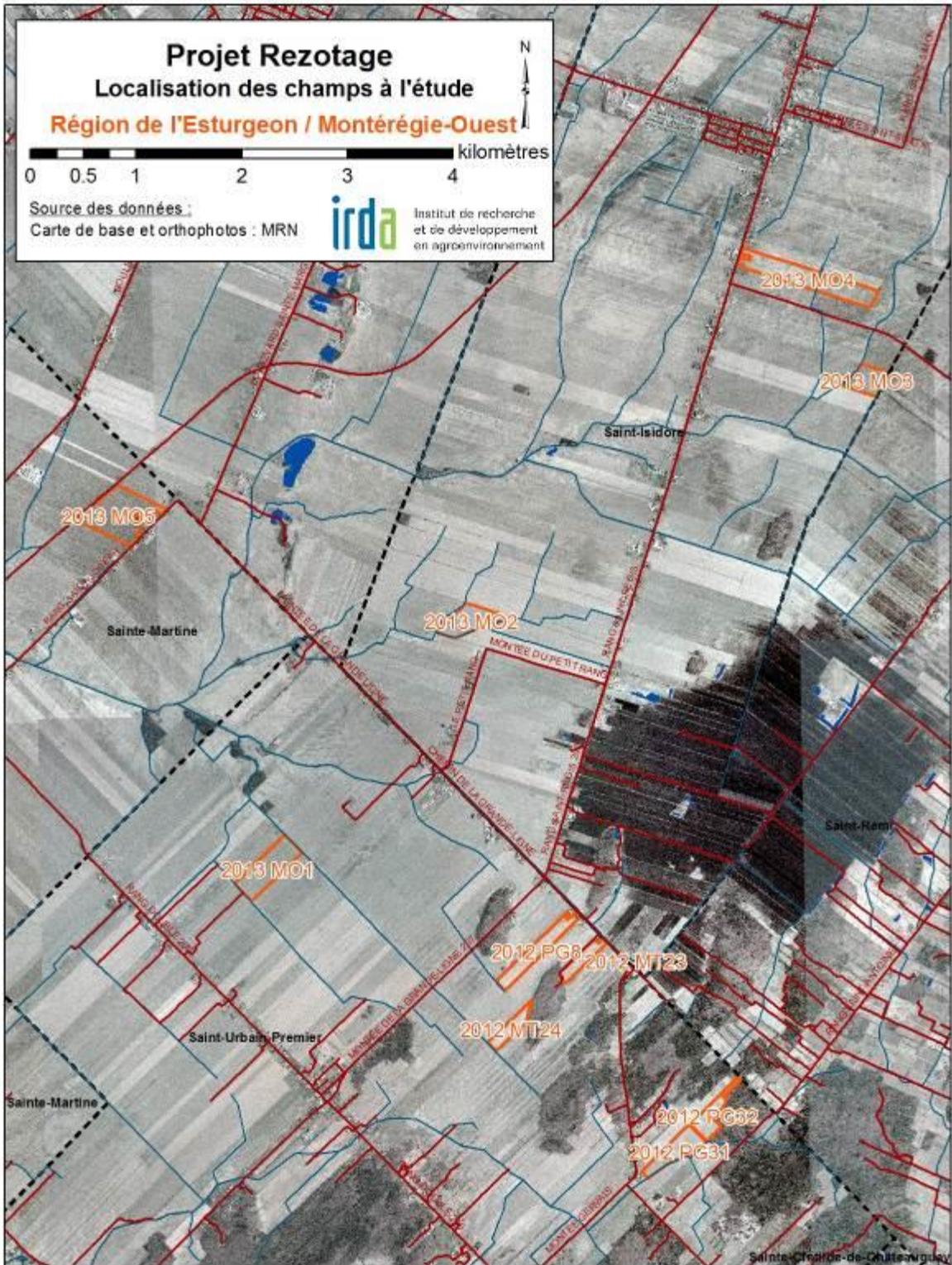


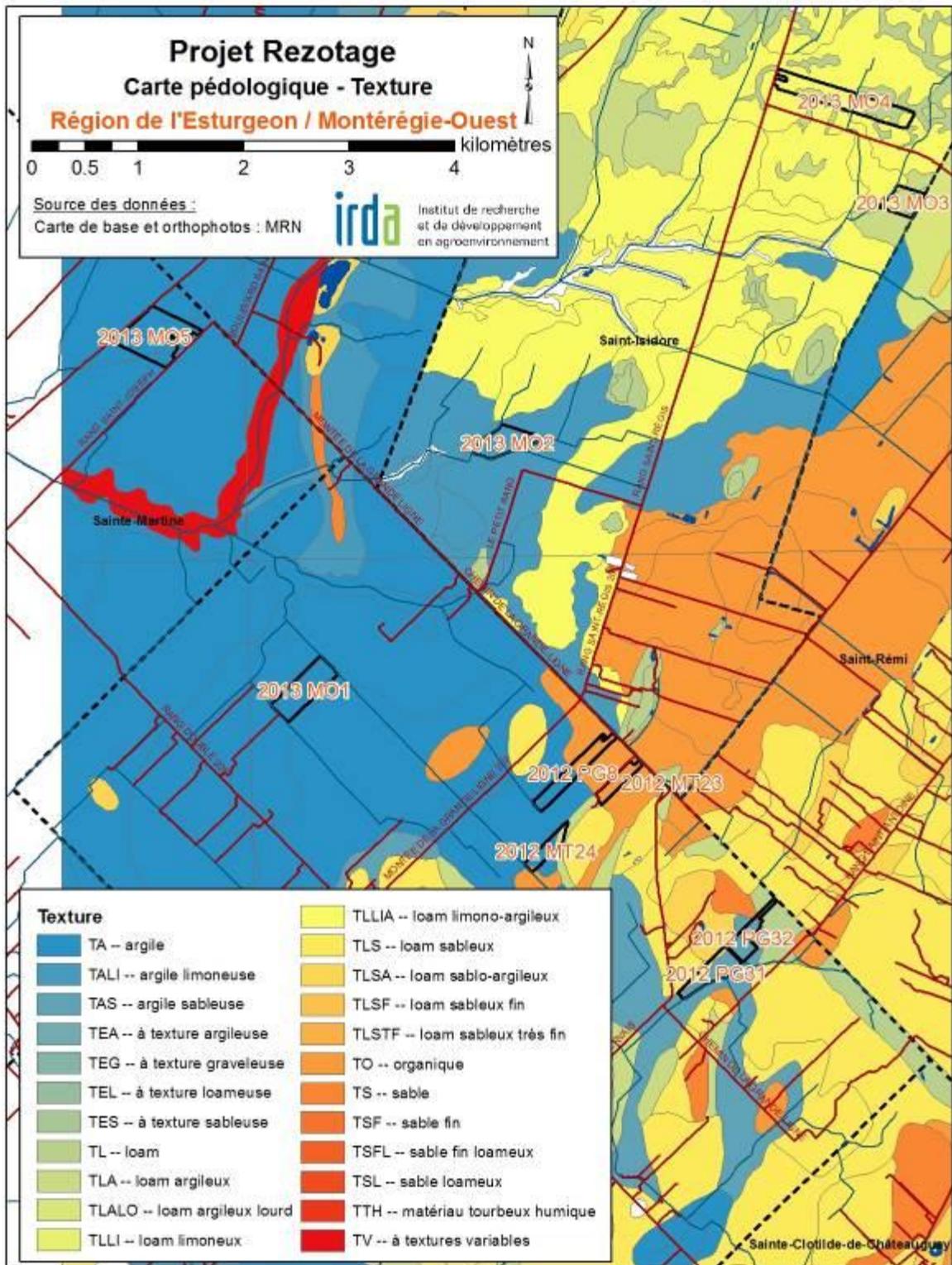


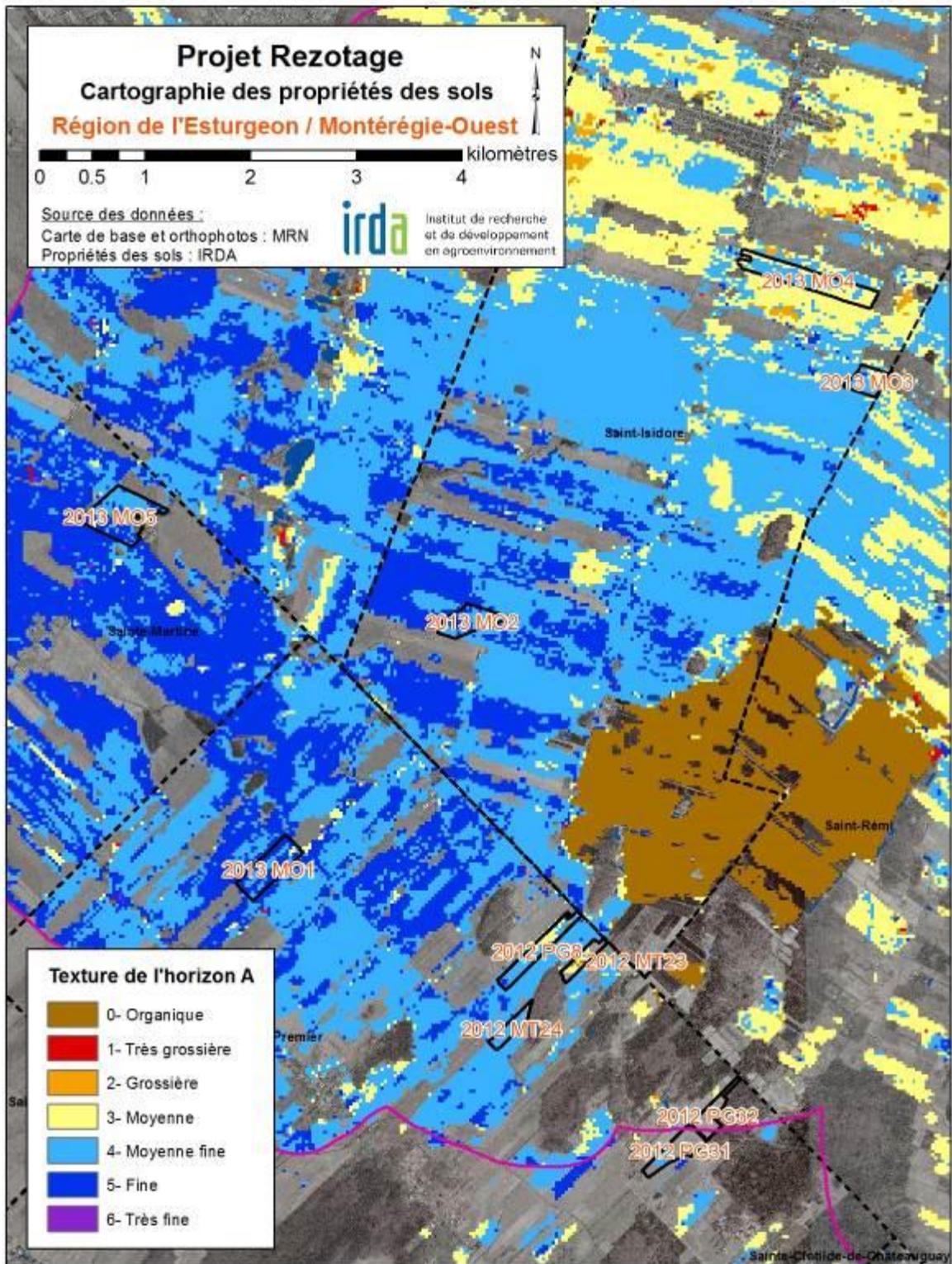


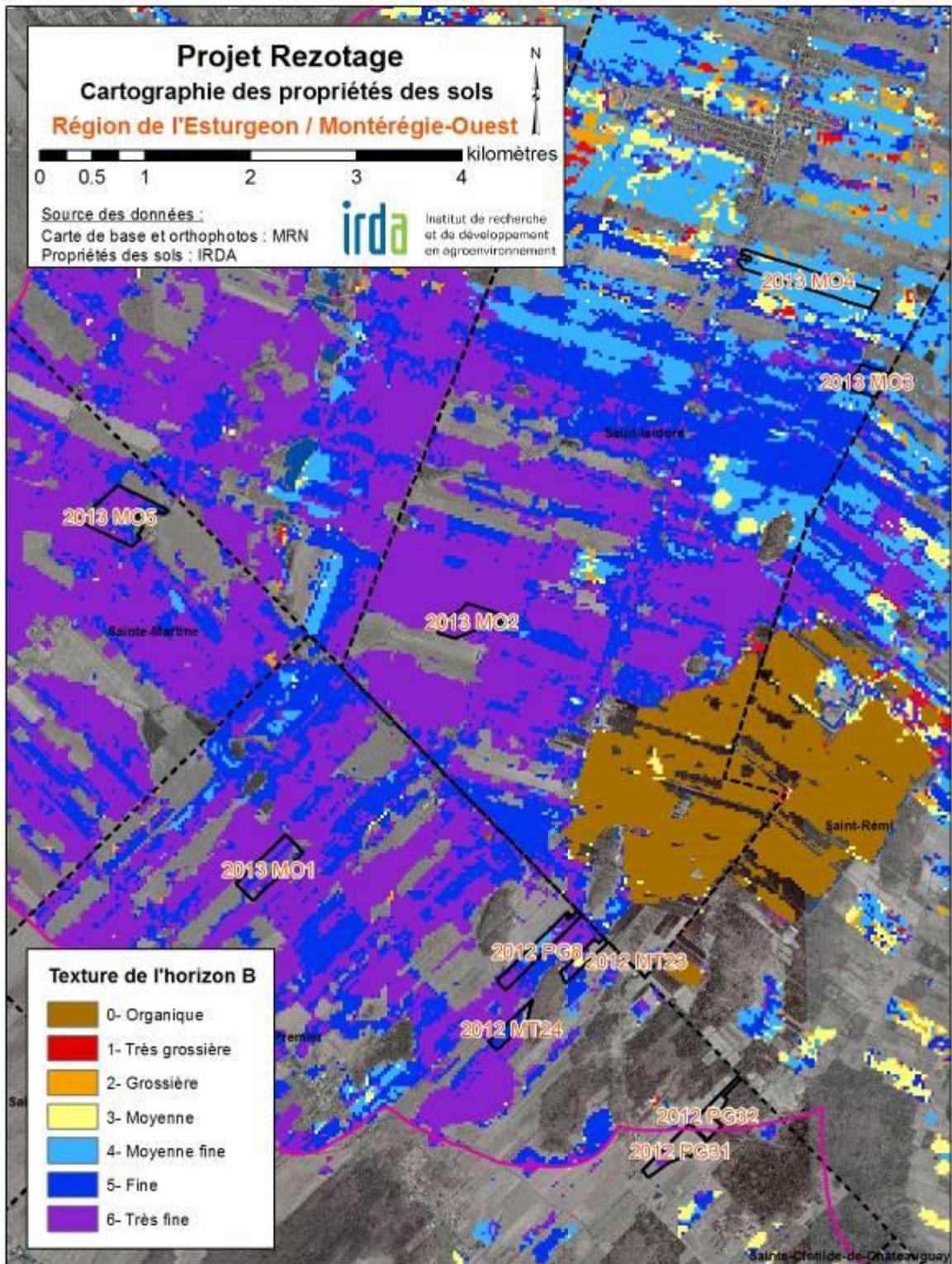


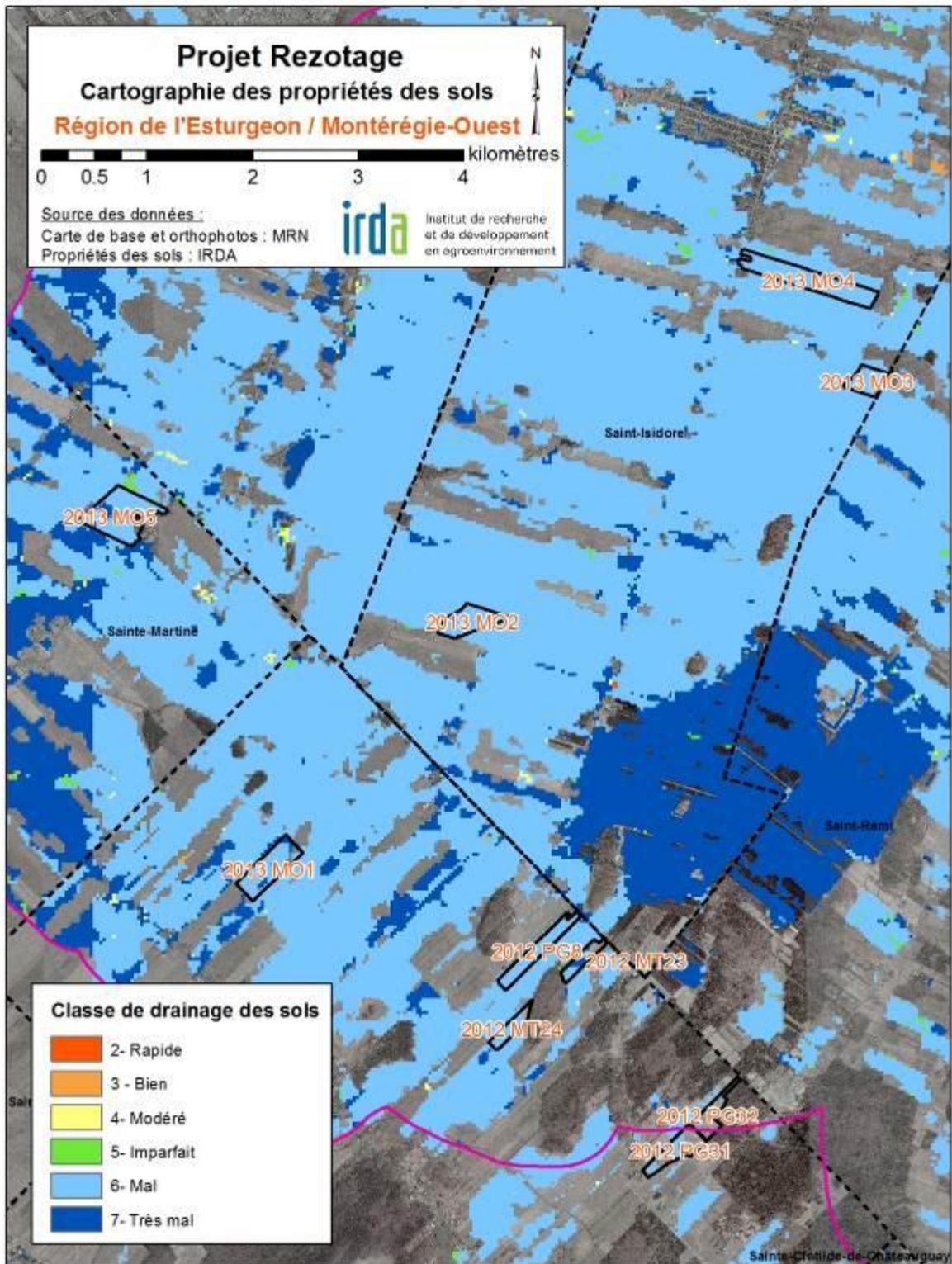












## Annexe 3 : Paramètres de calage de SWAT

### Paramètres de calages de SWAT

Fichier	Paramètre	WALBRIDGE INTERVENTION (BV4)	WALBRIDGE TEMOIN (BV 5)
.BSN	SFTMP	-1.5	-1.5
	SMTMP	-1.5	-1.5
	SMFMX	4	4
	SMFMN	1	1
	TIMP	0.87	0.87
	SNOCOVMX	100	100
	SNO50COV	1	1
	SURLAG	0.5	0.5
	APM	0.5	0.5
	PRF	0.5	0.5
	SPCON	0.005	0.005
	SPEXP	1	1
	UBP	27.5	27.5
	PPERCO	10	10
	PHOSKD	200	200
	PSP	0.4	0.4
	NUPDIS	1	1
	NPERCO	0.2	0.2
	CMN	0.0003	0.0003
.GW	SHALLST	500	500
	DEEPST	50	50
	GW_DELAY	10 : forêt et verger 2 : autres	0 : forêt et verger 2 : autres
	ALPHA_BF	1	1
	GWQMN	100	100
	GW_REVAP	0.2	0.2
	REVAPMN	125	125
	RCHRG_DP	0.15	0.15

Fichier	Paramètre	WALBRIDGE INTERVENTION	WALBRIDGE TEMOIN
.HRU	OV_N	CORN = 0.12 SOYB = 0.12 OATS = 0.12 APPL = 0.70 RNGB = 0.35 PAST = 0.35 FRST = 0.70 UTRN = 0.10	CORN = 0.12 SOYB = 0.12 OATS = 0.12 APPL = 0.7 RNGB = 0.35 PAST = 0.35 FRST = 0.7 Urbain = 0.1
	SLSUBBSN	Cultures et pâturages : 75 Autres : 65	Cultures et pâturages : 80 Autres : 70
	SLSOIL	--	--
	ESCO	1	1
	EPCO	Urbain : 0 Pâturages et friche : 0.4 Céréales : 0.6 Forêt et verger : 1	Urbain : 0 Pâturages et friche : 0.4 Céréales : 0.6 Forêt et verger : 1
	ERRORGP	Cultures : 1.7 Autres : 1	Cultures : 1.7 Autres : 1
.MGT	FILTERW (dans .mgt dans swat2005)	1	1
	DRRAIN(dans .mgt dans swat2005)	900	900
	TDRAIN(dans .mgt dans swat2005)	48	48
	GDRAIN(dans .mgt dans swat2005)	24	24
RTE	CH_S2	0.004	0.004
	CH_N2	0.07	0.02
	CH_K2	6	6
	CH_EROD	0.01	0.01
	CH_COV	0.05	0.05
SUB	CH_K1	8	4
	CH_N1	0.06	0.06
	CH_S1	0.002	0.001
	SNOSUB	16	16

**Numéro de courbes utilisés dans le scénario tout de référence (maïs; 150N printemps)**

Bassin amont (4) 80%

Bassins Témoin (5) 90%

CN utilisés		A	B	C	D	A	B	C	D
<b>Maïs</b>	CN2	61.6	68.8	72.8	75.2	69.3	77.4	81.9	84.6
	travail du printemps	61.6	68.8	72.8	75.2	69.3	77.4	81.9	84.6
	Semence	53.6	62.4	68.0	71.2	60.3	70.2	76.5	80.1
	Récolte	53.6	62.4	68.0	71.2	60.3	70.2	76.5	80.1
	Travail d'automne	61.6	68.8	72.8	75.2	69.3	77.4	81.9	84.6

**Dates des opérations des scénarios de fertilisation**

- Épandage au printemps : 4 mai
- Incorporation immédiate : 4 mai
- Semis : 5 mai
- Fertilisation post-levée : 17 juin
- Récolte : 12 octobre
- Travail d'automne : 24 octobre

## Annexe 4 : Données météorologiques

Précipitation mensuelle totale à la station météorologique de Farnham de 2001 à 2006

Précipitation mensuelle totale (mm)															
Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Précipitation annuelle	Précipitation Mai et juin	Précipitation Avril à juin
2001	57	65	86	15	79	119	139	113	41	72	89	60	934	198	213
2002	64	30	53	91	135	187	150	56	140	106	93	51	1157	322	413
2003	28	39	93	77	96	86	84	111	65	164	117	207	1170	182	259
2004	34	38	61	7	98	73	110	104	41	33	63	110	772	171	178
2005	40	46	40	109	53	81	99	101	111	183	116	76	1056	134	243
2006	88	49	45	95	194	162	85	125	81	159	95	114	1291	356	451