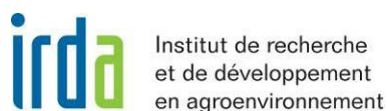




GRISE (Gestion raisonnée et intégrée des sols et de l'eau)

PROJET no 6062

L'INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT (IRDA)



LA COOPÉRATIVE DE SOLIDARITÉ DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE AUX BROCHETS



Rapport final

Septembre 2009

Aubert Michaud, chercheur et coordonnateur du projet, IRDA
Julie Deslandes, professionnelle de recherche, IRDA
Gilles Gagné, chercheur, IRDA
Lucie Grenon, agronome pédologue, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Karine Vézina, stagiaire, Université de Sherbrooke

Table des matières

Description du projet.....	6
1.1 Objectif général	6
1.2 Objectifs spécifiques	7
1.2.1 Supporter le diagnostic et l'intervention sur mesure dans l'aménagement hydro-agricole du parcellaire.....	7
1.2.2 Réduire l'intensité du ruissellement de surface et prévenir la contamination diffuse des eaux de surface.....	7
1.2.3 Subdiviser les parcelles agricoles en unités homogènes de sol requérant les mêmes besoins en termes de nutriments et d'aménagement	8
1.3 Étapes et calendrier de réalisation	8
Méthodologie, résultats et analyse	10
2.1 Acquisition et traitement des images numériques multispectrales	10
2.1.1 Relevés aéroportés et prétraitements	10
2.1.2 Indice d'égouttement du sol	12
2.2 Acquisition et traitement des données LIDAR	13
2.2.1 Acquisition des relevés aéroportés et prétraitements.....	13
2.2.2 Interpolation des points d'élévation provenant du relevé LIDAR.....	14
2.2.3 Évaluation de la précision des données LIDAR	16
2.2.4 Modélisation des patrons d'écoulement du ruissellement de surface, des sous-bassins et des dépressions	19
2.3 Dimensionnement des structures de contrôle du ruissellement.....	21
2.3.1 Évaluation du temps de concentration	22
2.3.2 Évaluation du débit de pointe.....	23
2.3.3 Évaluation des débits maximaux des structures.....	23
2.4 Cartographie du risque d'érosion et de pollution diffuse.....	24
2.5 Segmentation du paysage en zones hydropédologiques.....	27
2.5.1 Acquisition et traitement des relevés pédologiques.....	27
2.5.2 Classification des attributs du paysage par LandMapR®.....	29
2.5.3 Validation de la segmentation du paysage en zones hydropédologiques	33
2.5.3.1 Validation statistique à l'échelle du champ (1:7 500)	33
2.5.3.2 Validation statistique de LandMapR® aux échelles territoriales (1:20 000 et 1:40 000)	41
2.5.4 Synthèse et implications opérationnelles.....	45
2.3 Analyse des résultats obtenus pour l'ensemble du projet	48
2.4 Impact.....	49
2.5 Diffusion des résultats	51
Histoire d'une réussite.....	54
Plan de financement et conciliation des dépenses.....	55
Annexe A : Méthodologie de dimensionnement des structures de contrôle du ruissellement à l'aide des données LiDAR.....	58
Annexe B : Résultats détaillés de l'analyse de variance des propriétés des champs expérimentaux selon les classes de formes de relief	71
Annexe C : Fréquences des valeurs des descripteurs pédologiques en fonction des classes de LandMapR® générées pour les bassins des ruisseaux Ewing et Walbridge	84

Liste des figures

Figure 1 : (a) Spectroradiomètre ASD de l'Université de Sherbrooke, (b) Signatures spectrales des 13 sites échantillonnés (en duplicata) à l'aide du spectroradiomètre ASD et définition des 3 bandes spectrales de la caméra Duncan MS-3100, (c) Panneau de réflectance de référence (64 %) déployé sur le site lors de l'acquisition aéroportée des images numériques.....	11
Figure 2: Image composée de fausses couleurs d'une partie du bassin versant du ruisseau Ewing au 31 mai 2006 qui permet de distinguer les patrons spatiaux dans l'égouttement du sol.....	12
Figure 3: Mosaïque des images multispectrales orthorectifiées du 31 mai 2006 (a) et indice de brillance des sols calculée à partir des mosaïques corrigées au plan radiométrique (b).	13
Figure 4 : Lignes de vol associées à l'acquisition aéroportée du relevé LiDAR.	14
Figure 5 : Modèles numériques d'altitudes produits à l'aide de la méthode IDW sur des pixels d'un demi-mètre de résolution.....	15
Figure 6 : Matrice des erreurs altimétriques moyennes absolues des MNA LiDAR et MNA GPS-VTT (a), et histogrammes des erreurs absolues de la zone A (b) et de la zone B (c).	16
Figure 7 : Parcours de l'eau et micro-bassins modélisés à partir du MNA LiDAR et du MNA GPS-VTT	18
Figure 8 : Exemple de la répartition spatiale et de la densité des relevés altimétriques par GPS-VTT (a) et LiDAR (b).	18
Figure 9 : Les parcours de l'eau (a), les micro-bassins des champs (b), les dépressions (c) et les courbes de niveau à une équidistance de 50 centimètres (d) dérivées du modèle numérique d'altitude produit avec les données LiDAR.	19
Figure 10 : Segmentation hydrologique produite par TNTMIPS avec les paramètres définis par défaut (a)-(b), avec le masque du réseau hydrographique et routier (c) et en fonction des limites des champs agricoles (d).	20
Figure 11 : Classification des micro-bassins versants du ruisseau Ewing réalisée en fonction de leur superficie (a) et en fonction de leurs exutoires localisés soit aux fossés ou directement au cours d'eau (b)	21
Figure 12 : Image de la couche d'information Bassin-dimensionnement de l'atlas électronique associée à chacun des micro-bassins des ruisseaux Ewing et Walbridge, incluant l'ensemble des informations pertinentes au dimensionnement de petites structures agricoles selon différents scénarios de volume de captage.....	24
Figure 13 : Cartographie des risques d'érosion réalisée sur l'ensemble des micro-bassins des ruisseaux Ewing Walbridge d'une superficie supérieure à 0,2 hectare.	26
Figure 14 : Localisation des sites caractérisés par les prospections pédologiques au 1:20 000, 1:40 000 et 1:7 500 sur les bassins des ruisseaux Ewing et Walbridge.	29
Figure 15 : Résultats de la stratification LandMapR© réalisée avec des résolutions de pixels du MNA LiDAR 5 m (a), 10 m (b) et 20 m (c).	31
Figure 16 : Image multispectrale et courbes de niveau (LiDAR) confrontées aux résultats de la stratification LandMapR© réalisée avec une résolution de 20 mètres sur les 3 champs expérimentaux.	32
Figure 17 : Classes texturales des sols des 3 champs expérimentaux échantillonnés lors de la prospection pédologique à l'échelle 1:7 500.....	34
Figure 18 : Boîte à moustache de TUKEY associée aux distributions des propriétés du sol des 3 champs échantillonnés au 1:7 500 incluant : a) le % d'argile, b) le % de sable; c) le % de limon, d) % de matière organique, e) pH, f) Élévation et h) % de pente.	35
Figure 19 : Résultats de l'analyse en composantes principales des propriétés du sol en fonction des zones hydropédologiques pour le champ 1, incluant la matrice de corrélation, les valeurs propres de la matrice de corrélation ainsi que les vecteurs propres des composantes principales.	37
Figure 20 : Résultats de l'analyse en composantes principales des propriétés du sol en fonction des zones hydropédologiques pour le champ 2, incluant la matrice de corrélation, les valeurs propres de la matrice de corrélation ainsi que les vecteurs propres des composantes principales.	37
Figure 21 : Résultats de l'analyse en composantes principales des propriétés du sol en fonction des zones hydropédologiques pour le champ 3, incluant la matrice de corrélation, les valeurs propres de la matrice de corrélation ainsi que les vecteurs propres des composantes principale.	38
Figure 22 : Distribution des moyennes et bornes des intervalles de confiance à 95 % des variables pédologiques associées à chacune des zones hydropédologiques des trois champs expérimentaux.	40

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des étapes du projet, leurs finalités ainsi que les échéances prévues et réelles.....	9
Tableau 2 : Description, temps de calcul et erreur (en valeur absolue) de trois méthodes d'interpolation qui ont été testés pour créer un MNA sur une tuile de 1 km ²	15
Tableau 3 : Fréquence d'échantillonnage des classes de relief pour les trois champs expérimentaux.	36
Tableau 4 : Synthèse des tests de l'effet fixe associé aux zones hydropédologiques générées par LandMapR© pour les propriétés des sols des trois champs expérimentaux.	40
Tableau 5 : Coefficients corrélation de Spearman entre les descripteurs pédologiques et les classes de LandMapR© pour les deux bassins versants à l'étude.	43
Tableau 6: Résultats du modèle de régression logistique appliqué aux données du bassin du ruisseau Walbridge incluant le chi-carré (a), les estimateurs du maximum de vraisemblance (b) et les estimateurs « odds Ratio » (c) pour le paramètre classe de drainage (DRAI).	45
Tableau 7: Résultats du modèle de régression logistique appliqué aux données du bassin du ruisseau Ewing incluant le chi-carré (a), les estimateurs du maximum de vraisemblance (b) et les estimateurs « odds Ratio » (c) pour le paramètre classe de drainage (DRAI).	46
Tableau 8: Activités de diffusion des résultats et de transfert technologique associés au projet GRISE.	52

Ce document peut être cité comme suit :

Michaud, A., J. Deslandes, G. Gagné, L. Grenon, et K. Vézina. 2009. Gestion raisonnée et intégrée des sols et de l'eau (GRISE). Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), Université de Sherbrooke, CDAQ, Québec, Québec, 87 p.

Cette étude a été réalisée en collaboration avec la Coopérative de Solidarité du bassin versant de la rivière au Brochet et rendue possible grâce à la participation financière du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ).

Collaborations scientifiques et techniques

Aubert Michaud	Chercheur en conservation des sols et de l'eau à l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Coordonnateur du projet, expertise en hydrologie, physique des sols, contamination diffuse des eaux de surface, géomatique, télédétection et modélisation appliquées à la gestion du parcellaire et des bassins versants.
Pierre Bélanger	LASERMAP-IMAGE PLUS, développeur et fournisseur privé en applications LIDAR et multispectrales.
Jacques Desjardins	Technicien agricole, IRDA, support au niveau du volet aménagement hydro-agricole.
Julie Deslandes	Professionnelle de recherche en géomatique et télédétection, IRDA. Modélisation hydrologique, traitement d'images et développement des atlas électroniques.
Gilles Gagné	Agronome pédologue, chercheur en pédologie, IRDA. Prospection pédologique et validation des approches de classification avec LandMapR®.
Ernest Gasser	Producteur agricole, et président de la Coopérative de solidarité de la rivière Aux Brochets.
Michèle Grenier	Statisticienne, IRDA. Support et analyse statistique.
Lucie Grenon	Agronome pédologue, Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). Responsable de la prospection pédologique et validation des approches de classification avec LandMapR®.
André Lavoie	Professionnel de recherche, Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL) de l'Université de Sherbrooke. Soutien en télédétection et étalonnage des images multispectrales.
Richard Lauzier	Agronome, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Mise en valeur des applications développées au cours du projet auprès des producteurs agricoles et à leurs applications en régie des sols et aménagement hydro-agricole.
Michael Leblanc	Étudiant-stagiaire à l'IRDA. Université Laval. Prospection pédologique.
R.A. MacMillan	Développeur de LandMapR®, LandMapper Environmental Solutions Inc. Encadrement et optimisation des capacités du logiciel LandMapR®.
Michel Nolin	Agronome pédologue, chercheur en sciences du sol, AAC. Validation des approches de classification avec LandMapR®.
Ivana Saint-Laurent	Technicienne en géomatique, IRDA. Support au niveau du traitement et de l'intégration de l'information à référence spatiale.
Jean-Daniel Sylvain	Étudiant-stagiaire à AAC et à l'IRDA. Université de Sherbrooke. Interface de saisie pour les données pédologiques, prospection pédologique et géomatique.
André Vézina	Professeur, ITA de La Pocatière. Soutien dans le captage des images numériques multispectrales.
Karine Vézina	Étudiante au doctorat en géomatique et télédétection, Université de Sherbrooke. Classification du territoire à l'aide du logiciel LandMapR®, prospection pédologique et validation des approches de classification.

DESCRIPTION DU PROJET

1.1 Objectif général

Au fil des vingt dernières années, les technologies d'acquisition et de traitement d'information à référence spatiale ont connu des développements spectaculaires. Ceux-ci présentent autant d'opportunités pour les gestionnaires d'entreprises agricoles impliqués en productions végétales, dont la productivité est largement tributaire de la connaissance et de la régie sur mesure de leur principal capital, le sol. Cette précieuse ressource présente cependant une grande variabilité, tant dans ses propriétés physiques que sa richesse en éléments nutritifs. Le projet GRISE (gestion raisonnée et intégrée des sols et de l'eau) s'est fixé comme objectif de tirer profit des avancées récentes en télédétection aéroportée, de même que dans l'analyse spatiale de ce type d'information, dans le développement d'applications en régie des sols et en aménagement hydro-agricole du parcellaire.

Les producteurs et conseillers agricoles ont recours aux photographies aériennes ou aux images numériques depuis plusieurs années dans le diagnostic des problèmes d'égouttement du parcellaire. Le croisement d'images printanières, révélatrices des gradients du drainage, avec des images estivales, qui témoignent de l'état des cultures, confirme généralement l'impact du mauvais égouttement sur le développement des cultures. Plus récemment, le développement des techniques d'acquisition de données d'élévation de haute précision au moyen de récepteurs GPS embarqués sur des véhicules tout terrain (VTT) ou sur la machinerie agricole, a permis de réaliser des modèles numériques d'altitude (MNA) qui reproduisent de façon très précise le relief des champs. Le post-traitement de ces données supporte la modélisation des parcours du ruissellement de surface, les formes et dimensions des micro-bassins, de même que les dépressions au champ (Rivest et Gosselin, 2000). Bien que l'acquisition de données de relief de précision par capteurs embarqués (VTT) ait fait ses preuves au Québec en matière de diagnostic et d'aménagement des terres, l'application de la technologie demeure limitée par les courtes fenêtres de temps propices à la circulation en VTT au champ. En production de maïs par exemple, la circulation est permise au printemps entre le travail secondaire du sol et la post-levée de la culture, alors que la période automnale propice se résume à l'intervalle compris entre le battage et le travail primaire du sol. Par ailleurs, l'acquisition valable des données, évitant le « décrochement » des satellites, requiert une vitesse modérée des VTT au champ et un patron de circulation intensif limitant l'acquisition de données à environ 6-7 ha par heure.

Compte tenu de l'intérêt des MNA en régie des sols et de l'eau, le développement de méthodes permettant de générer de telles informations sur de grands territoires revêt une importance stratégique, tant dans une optique de productivité des cultures que de la prévention de la contamination diffuse des eaux de surface. À cet égard, l'acquisition aérienne de données de relief de précision au moyen de la technologie LIDAR (Light Detection And Ranging) présente un fort potentiel d'application en régie et aménagement des terres. Le LIDAR est une technologie émergente qui met à profit des pulsations laser permettant de générer une donnée d'élévation d'une précision verticale de l'ordre de 5 à 15 cm, dépendamment de la densité du relevé et de la nature du site. En plus de réduire substantiellement le coût d'acquisition de la donnée et de produire un relevé plus dense qu'un captage au sol, cette technologie permet d'agrandir la fenêtre de temps ainsi que la superficie couverte par le relevé. Par ailleurs, cette technologie permet d'effectuer simultanément le relevé des fossés de drainage et autres secteurs peu accessibles par VTT, améliorant du coup la continuité du modèle numérique d'altitude produit.

La réalisation du projet GRISE a tiré profit de la technologie LIDAR, complémentée par l'acquisition d'images numériques aériennes, dans le développement et la validation d'un ensemble d'outils de diagnostic et de régie du parcellaire. Ce développement s'inscrit en support à l'action concertée d'une communauté d'entreprises agricoles impliquées dans la mise en valeur du bassin versant de la Baie Missisquoi, en Montérégie. Concrètement, des cartes et des atlas électroniques ont été mis à la disposition de l'ensemble des producteurs et des conseillers agricoles de la région à l'étude afin de supporter, à l'échelle intra-parcellaire, le diagnostic de l'égouttement et l'aménagement hydro-agricole des champs, de même que la subdivision des parcelles en unités distinctes de sol, destinées à supporter une régie localisée de la fertilisation, des amendements et des pratiques culturales.

1.2 Objectifs spécifiques

1.2.1 Supporter le diagnostic et l'intervention sur mesure dans l'aménagement hydro-agricole du parcellaire

Compte tenu des conditions agro-climatiques propres au Québec, l'égouttement du parcellaire et la condition physique des sols viennent en tête de liste des facteurs limitant les rendements et la qualité des récoltes. Les suivis hydrométriques réalisés en bassins versants agricoles expérimentaux témoignent de bilans hydriques excédentaires variant de 200 à 600 mm par an selon les régions et les précipitations annuelles (Michaud et coll., 2004a, 2004b). Lorsque la parcelle présente un égouttement déficient, ces surplus d'eau engendrent des problèmes de compaction, un mauvais développement racinaire des cultures et des pertes de rendement. Malgré l'aménagement du drainage souterrain systématique dans une proportion importante du parcellaire en culture au Québec, plusieurs facteurs contribuent au déficit d'égouttement dans certaines zones des champs, incluant des nappes perchées, l'écoulement hypodermique vers le bas des pentes, la convergence du ruissellement de surface provenant de grandes superficies contributives ou l'absence d'exutoire. La correction sur mesure des zones mal égouttées vise à assurer un réchauffement rapide des sols au printemps ainsi que de bonnes conditions physiques du sol, propices à la réalisation de bons lits de semence, des opérations culturales et de récolte sans encombres, de même qu'à assurer une meilleure dynamique de prélèvement des éléments nutritifs par les plantes, un rendement soutenu et une qualité optimale des cultures.

L'outil de gestion développé dans le cadre du projet GRISE permet de cerner les zones problématiques du parcellaire au plan de l'égouttement des sols et il fournit toutes les données requises à un aménagement hydro-agricole optimal, spécifiquement adapté aux conditions topographiques et pédologiques de la parcelle. D'une part, le traitement des données LiDAR a supporté la réalisation d'un modèle numérique d'altitude (MNA) d'une grande précision, permettant de dériver une cartographie très fine des cheminements de l'eau en surface, fort utile dans l'aménagement sur mesure des champs. Les images multispectrales ont pour leur part permis de dériver un indice de brillance des sols qui témoigne des zones mal égouttées du parcellaire.

En parallèle au diagnostic d'égouttement du parcellaire, le projet GRISE a supporté le développement d'une méthodologie automatisée de conception des structures de contrôle du ruissellement de surface à partir des relevés LiDAR. Le dimensionnement de ces aménagements hydro-agricoles, selon les critères de conception établis au Québec (Stämpfli et coll., 2007b), requiert notamment trois paramètres, soit la longueur du parcours de l'eau, la pente globale et la superficie des micro-bassins. La méthode développée supporte ces estimations de façon systématique et a été appliquée à l'ensemble des micro-bassins du ruisseau Ewing, le principal territoire à l'étude.

1.2.2 Réduire l'intensité du ruissellement de surface et prévenir la contamination diffuse des eaux de surface

Les zones mal égouttées du parcellaire sont non seulement associées à de faibles rendements des cultures, mais aussi à une vulnérabilité élevée au ruissellement de surface. La correction des problèmes d'égouttement des champs en culture contribue ainsi à réduire à la source l'exportation diffuse de sédiments, de nutriments, pesticides ou microbes pathogènes vers les cours d'eau et les lacs. Puisque les zones mal égouttées occupent une portion relativement limitée du parcellaire en culture, il convient de bien cibler ces zones dans la perspective d'obtenir des réductions tangibles de la contamination diffuse à moindre coût. Les diagnostics d'égouttement supportés par le LiDAR et les images numériques dans le cadre du projet GRISE ont permis de localiser les zones les plus vulnérables à la pollution diffuse dans les bassins versants des ruisseaux Ewing et Walbridge ciblés pour l'étude. Les MNA dérivés du LiDAR ont par ailleurs contribué au développement d'une méthodologie de prédiction des taux nets d'érosion, appliquée à l'ensemble du territoire à l'étude. Une telle quantification du risque d'érosion constitue un outil complémentaire à la représentation spatiale de l'égouttement et du ruissellement dans l'identification des priorités d'intervention et l'étude de scénarios alternatifs de gestion du parcellaire.

En parallèle au développement des outils de gestion du parcellaire, la réalisation du projet GRISE a soutenu plusieurs activités de transfert des connaissances en support à l'action concertée de la Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière Aux Brochets (CSBVRB, 2007, projet Lisière verte, financé par le Programme pour l'avancement du secteur canadien de l'agriculture et de l'agroalimentaire (PASCAA)). Cette initiative communautaire a pour principal objectif d'évaluer la

faisabilité de rétribuer les entreprises agricoles pour leur production de biens et services environnementaux. Concrètement, le projet Lisière Verte est à la source d'un vaste chantier d'aménagement riverain des tributaires les plus vulnérables du secteur aval de la rivière Aux Brochets, principal cours d'eau alimentant la Baie Missisquoi en territoire québécois. Le bassin versant Ewing, entièrement ciblé par le projet Lisière Verte, a ainsi servi de banc d'essai, sur le plan opérationnel, aux outils à référence spatiale développés dans le cadre du projet GRISE. Des rencontres d'information et des activités de formation auprès des producteurs et conseillers agricoles de la région (MAPAQ, Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière Aux Brochets, Dura-Club) ont ainsi permis de valider et de diffuser largement les outils développés. Des atlas électroniques à l'échelle du bassin versant et des cartes thématiques personnalisées à l'échelle de la ferme ont été mis à la disposition des conseillers et producteurs agricoles en support au diagnostic terrain et à la planification des aménagements hydro-agricoles complémentaires au projet Lisière verte.

1.2.3 Subdiviser les parcelles agricoles en unités homogènes de sol requérant les mêmes besoins en termes de nutriments et d'aménagement

En complément aux applications en gestion de l'eau, le projet GRISE a supporté le développement d'une cartographie de la variabilité spatiale des propriétés des sols. Cette subdivision du parcellaire en unités homogènes de sol a pour but de soutenir la modulation intra-parcellaire de la régie des sols et des cultures (gestion localisée ou par zones). L'approche retenue consiste à reconnaître puis distinguer des zones du parcellaire en fonction de leur position occupée dans le paysage du bassin versant et met ainsi à profit le modèle numérique d'élévation acquis au moyen du relevé LiDAR. Dès lors, il est postulé que ces zones se distinguent quant au transfert et à l'accumulation d'eau et de nutriments en raison de leurs attributs topographiques. Cette variabilité spatiale des propriétés physico-chimiques du sol conditionne le potentiel de rendement des cultures et appelle à une gestion localisée du parcellaire.

Le logiciel LandMapR© (MacMillan *et coll.*, 2000) a été utilisé en support à la segmentation des paysages du territoire à l'étude en une multitude d'attributs topographiques, puis à leur classification selon des entités distinctes au plan hydropédologique. La validation de l'approche de segmentation retenue a été supportée par des prospections pédologiques à diverses échelles d'étude, soit au 1:7500 (3 champs), au 1:20000 (bassin du ruisseau Walbridge) et au 1:40 000 (bassin du ruisseau Ewing). À l'échelle intra-parcellaire (1:7 500), 120 profils de sol ont été décrits et échantillonnés afin de valider l'adéquation de la classification hydropédologique produite par LandMapR© avec la réalité terrain. La validation de la segmentation hydropédologique aux échelles 1:20 000 et 1:40 000 a pour sa part profité de la caractérisation de 360 profils de sol. Dans l'ensemble, les prospections pédologiques ont validé l'approche de segmentation du paysage soutenue par LandMapR© dans la discrimination spatiale des propriétés du parcellaire au plan hydropédologique. Cette première, à l'échelle québécoise et nord-américaine, à notre connaissance, pave la voie à l'exploitation des MNA de haute précision dans la gestion localisée des sols au Québec. Par ailleurs, les pédologues impliqués dans le projet concluent à la pertinence de cet outil dans la segmentation des pédo-paysages et la différenciation des délimitations cartographiques des séries de sol. Ils prévoient ainsi avoir recours à cette approche dans leurs prochains travaux de prospection et de cartographie des sols.

1.3 Étapes et calendrier de réalisation

Les différentes étapes du projet GRISE, de même que leurs finalités et le calendrier de réalisation sont présentés au tableau 1. Dans l'ensemble, les étapes du projet se sont déroulées telles qu'initialement prévues, aucune difficulté particulière n'a été rencontrée. Les consultations et échanges avec les intervenants du milieu, principalement constitués par les intervenants du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, de la Coopérative de solidarité de la rivière Aux Brochets et du club conseil en agroenvironnement Dura-Club, ont ponctué le projet de façon continue. La mise à jour et le transfert des atlas électroniques et des cartes imprimées se sont adaptés aux commentaires et aux recommandations formulés par ces partenaires en cours de projet. L'acquisition de relevés très détaillés de la conductivité électrique du sol par le biais de la technologie VERIS a cependant été abandonnée, au profit d'un échantillonnage à haute densité des trois parcelles ciblées pour la validation des zones hydropédologiques. Par ailleurs, la quantification du risque de ruissellement et d'érosion, de même que le calcul des paramètres de conception des structures de contrôle du ruissellement constituent des livrables additionnels, non prévus dans la proposition initiale du projet.

Tableau 1 : Liste des étapes du projet, leurs finalités ainsi que les échéances prévues et réelles

Activités	Date prévue	Date réelle	Finalités
Mettre à jour la licence des logiciels utilisés et acquérir le matériel informatique.	Mai 2006	Mai 2006 à avril 2007	Faciliter le traitement des données acquises dans le cadre du projet.
Acquérir les relevés aéroportés LiDAR et les images multispectrales.	Mai à octobre 2006	Mai 2006	Caractériser le territoire à l'étude.
Réaliser l'orthorectification et la mosaïque des images multispectrales.	Mai à octobre 2006	Octobre 2006	Rectifier les 420 images brutes déformées et les assembler de façon à créer une seule image.
Intégrer, nettoyer le signal LiDAR et contrôler la qualité des données.	Mai à octobre 2006	Septembre 2006	Obtenir des données altimétriques précises.
Interpoler les points d'élévation provenant du relevé LiDAR afin de générer un modèle numérique d'altitude (MNA).	Mai à octobre 2006	Octobre 2006	Obtenir une représentation altimétrique continue de l'ensemble du territoire afin de pouvoir dériver des divers indices topographiques.
Évaluer la précision des données LiDAR à l'aide de relevés existants (acquis par GPS-VTT) sur le territoire de validation (bassin Walbridge).	Novembre 2006	Novembre 2006	Comparer les données LiDAR et ses dérivées à d'autres sources de données altimétriques.
Modéliser à partir du MNA, les patrons d'écoulement du ruissellement de surface, les sous-bassins et les dépressions.	Novembre 2006 à janvier 2007	Décembre 2006	Savoir comment l'eau ruisselée se déplace à l'échelle des champs de façon à mieux la gérer.
Extraire les indices topographiques (pente, aspect, orientation etc.).	Novembre 2006 à janvier 2007	Janvier 2007	Caractériser le territoire à l'étude.
Extraire, des images numériques, un indice d'égouttement du sol.	Novembre 2006 à janvier 2007	Janvier 2007	Identifier les zones les moins productives dans les champs qui sont également vulnérables au ruissellement, à l'érosion et aux exportations de nutriments.
Produire une cartographie des risques de pollution diffuse, basée sur les attributs biophysiques des sous-bassins de l'ensemble des champs.	Novembre 2006 à janvier 2007	Janvier 2007	Établir les priorités d'intervention sur le territoire étudié et supporter l'implantation de pratiques ou d'aménagements de conservation du sol et de l'eau.
Segmenter les données d'élévation en fonction d'attributs du paysage.	Novembre 2006 à janvier 2007	Janvier 2007	Caractériser la variabilité spatiale de la nature des sols avec le logiciel LandMapR®
Acquérir une couverture pédologique de 1 échantillon par 16 hectares sur le territoire couvert par les relevés aéroportés.	Mai 2006 à décembre 2007	En cours de réalisation	Valider la segmentation réalisée par le biais du logiciel LandMapR®.
Intégration de l'ensemble des données et réalisation du premier prototype d'atlas électronique.	Avril 2007	Février 2007	Offrir un outil intégré aux intervenants locaux.
Constituer un forum d'utilisateurs regroupant les producteurs, conseillers agricoles et intervenants en aménagement du territoire. Expliquer le projet à ces intervenants.	Mai à juin 2006	Avril 2007	Valoriser cet outil de diagnostic et d'intervention auprès des agriculteurs et des intervenants du milieu.
Donner des séances de formation aux utilisateurs afin de leur expliquer les données disponibles ainsi que les fonctionnalités de l'atlas.	Février à août 2007	Juin 2007 à décembre 2008	Valoriser cet outil de diagnostic et d'intervention auprès des agriculteurs et des intervenants du milieu.
Acquérir des relevés très détaillés de la conductivité électrique du sol par le biais de la technologie VERIS sur quelques champs ainsi qu'une couverture pédologique détaillée (une observation par hectare).	Mai 2006 à décembre 2007	Véris non-réalisé	Évaluer l'efficacité de la segmentation du territoire par LandMapR® à l'échelle du champ.

Activités	Date prévue	Date réelle	Finalités
Produire des recommandations à l'égard de l'utilisation des données multispectrales et LiDAR pour raffiner les cartes pédologiques existantes.	Janvier 2007 à mai 2008	Août 2008	Tirer des conclusions de l'expérience.
Faire des séances de consultation/validation sur les fonctionnalités du système d'information en développement.	Janvier 2008	Pendant l'ensemble de la durée du projet	Adapter l'outil développé aux besoins spécifiques des intervenants locaux.
Suite aux consultations, apporter des améliorations à l'atlas afin de répondre aux besoins identifiés par les utilisateurs.	Janvier à mars 2008	Jusqu'en août 2008, des mises à jour ont été apportées à l'atlas	Adapter l'outil développé aux besoins spécifiques des intervenants locaux.
Rédaction du manuel de l'utilisateur.	Janvier 2007 à mars 2008	Août 2008	Transfert technologique.
Créer des fiches techniques détaillant les pistes de solution ou les aménagements pouvant corriger chaque problème typiquement recensé sur la zone d'étude (coût, spécifications, entretien, etc.).	Janvier 2007 à mars 2008	Non-réalisée, utilisation des fiches produites par d'AAC.	Transfert technologique.
Rédaction et édition du rapport de recherche et des publications scientifiques. Présentation des résultats lors de congrès.	Avril 2008 à mai 2008	Août à décembre 2008	Transfert technologique.

MÉTHODOLOGIE, RÉSULTATS ET ANALYSE

Cette section présente successivement les méthodologies retenues et les résultats associés au traitement de l'ensemble des données à référence spatiale mises en valeur dans le cadre du projet GRISE, soit les données LiDAR, les images numériques multispectrales, la classification du MNE par LandMapR®, les relevés pédologiques, le dimensionnement des structures hydro-agricoles, la cartographie des risques d'érosion et de pollution diffuse, de même que la validation de LandMapR® sur la base des relevés pédologiques multi-échelles.

2.1 Acquisition et traitement des images numériques multispectrales

2.1.1 Relevés aéroportés et prétraitements

Plus de 420 images numériques multispectrales d'une résolution spatiale de 66 cm ont été captées à une altitude de 2 000 mètres à l'aide de la caméra Duncan MS-3100 prêtée par l'ITA de La Pocatière. Cette caméra possède une résolution spectrale de 3 bandes dont les longueurs d'onde se situent à 550 nm (+/- 35 nm) pour le vert, 650 nm (+/- 35 nm) pour le rouge et 800 nm (+/- 40 nm) pour le proche infrarouge (PIR). Les images ont été orthorectifiées par le partenaire au projet Lasermap Image Plus, afin de corriger les déformations « géométriques » induites par le relief des surfaces photographiées et l'angle de vue de la caméra par rapport aux cibles. Finalement, deux mosaïques d'images ont été produites pour le bassin du ruisseau Ewing et la portion couverte du bassin du ruisseau Walbridge.

Une correction radiométrique a été ensuite réalisée pour convertir la valeur des pixels des images (des comptes numériques CN de 8 bits) en valeurs physiques caractérisant le rapport de l'éclairement solaire réfléchi par la surface au flux incident. Cette valeur permet de dériver des indices liés au sol et à la végétation. Des étalonnages radiométriques distincts ont été appliqués aux deux mosaïques puisque les paramètres d'acquisition des images ont été modifiés pendant le vol. La correction radiométrique a été réalisée à l'aide de 5 panneaux de réflectance de référence, respectivement de 4, 8, 16, 32 et 64 %, et mise en place avant l'acquisition des images (Figure 1c). En complément des panneaux de réflectance, seize signatures spectrales, caractérisant 8 cibles différentes (sol nu, prairie, route), ont été prélevées à l'aide du spectroradiomètre ASD FR Jr de l'Université de Sherbrooke (Figure 1b). Deux mesures de réflectance de chaque panneau ont également été prélevées. Pour chaque bande spectrale de la caméra, des régressions linéaires simples ont été établies entre les comptes numériques (CN) moyens des pixels associés à chacune des 13 cibles (incluant les panneaux) et les réflectances moyennes

mesurées par l'ASD pour les longueurs d'onde correspondant à chaque bande spectrale. Les équations suivantes décrivent les corrections qui ont été appliquées aux bandes des deux mosaïques afin d'obtenir des images exprimées sur la base de réflectances :

Bassin du ruisseau Walbridge

Vert	$y = 0,1561(CN) - 5,7952$	$r^2 = 0,99$
Rouge	$y = 0,1318(CN) - 5,6175$	$r^2 = 0,91$
PIR	$y = 0,3812(CN) - 23,6913$	$r^2 = 0,99$

Bassin du ruisseau Ewing

Vert	$y = 0,1471(CN) - 5,5270$	$r^2 = 0,97$
Rouge	$y = 0,0980(CN) - 3,3719$	$r^2 = 0,99$
PIR	$y = 0,3698(CN) - 21,349$	$r^2 = 0,89$

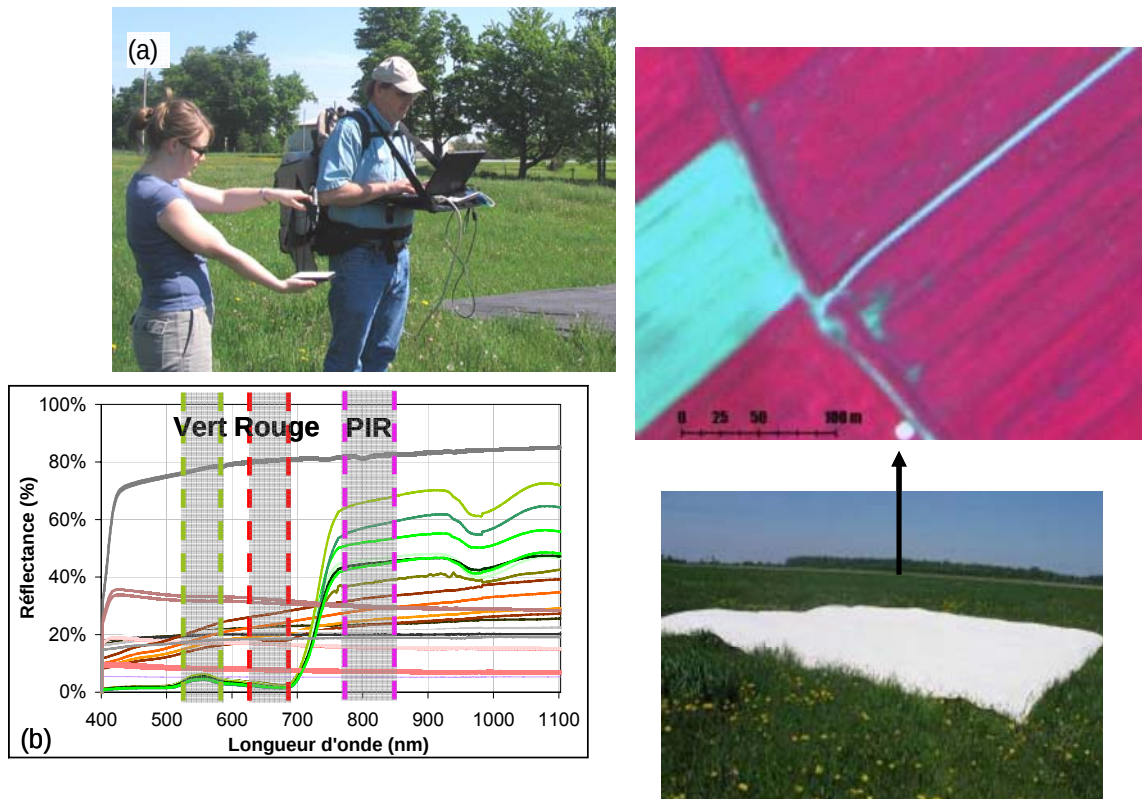


Figure 1 : (a) Spectroradiomètre ASD de l'Université de Sherbrooke, (b) Signatures spectrales des 13 sites échantillonnés (en duplicata) à l'aide du spectroradiomètre ASD et définition des 3 bandes spectrales de la caméra Duncan MS-3100, (c) Panneau de réflectance de référence (64 %) déployé sur le site lors de l'acquisition aéroportée des images numériques.

Des composés colorés de fausses couleurs¹ ont par la suite été constitués pour afficher les images multibandes. La bande verte a été assignée au bleu; la bande rouge au vert, et la bande du proche infra-rouge (PIR) au rouge. Sur l'image, la végétation apparaît ainsi en rouge, puisqu'elle possède un coefficient de réflexion (réflectance) élevé pour la partie du rayonnement solaire située dans le proche infrarouge. L'eau apparaît en noir puisqu'elle possède la propriété d'absorber tout le rayonnement solaire. Le sol apparaît en vert-bleu sur l'image puisque, comparativement à la végétation, il réfléchit peu le proche-infrarouge et plus les longueurs d'onde vertes et rouges (associées respectivement aux couleurs bleues et vertes dans le composé fausses couleurs). Les variations de ton associées au sol sont alors attribuables à sa couleur, sa texture, sa structure et à son humidité. En général, les sols les plus humides, ou contenant plus de matière organique, se traduisent par des gammes de bleu plus foncé. La figure 2 présente un exemple où l'assèchement du sol engendré par le drainage souterrain rend possible la localisation des drains. Ces derniers apparaissent sous forme d'éléments linéaires clairs intercalés avec

¹ Une image dont les bandes spectrales sont affichées dans une combinaison de couleurs différentes des couleurs d'acquisition (Ressources naturelles Canada, 2005).

des lignes plus foncées, représentatives du sol plus humide. L'image permet ainsi d'interpréter l'hydro-activité du parcellaire, soit d'identifier les zones où les sols demeurent humides pendant des longues périodes de temps, ce qui les rend plus propices au ruissellement de surface.

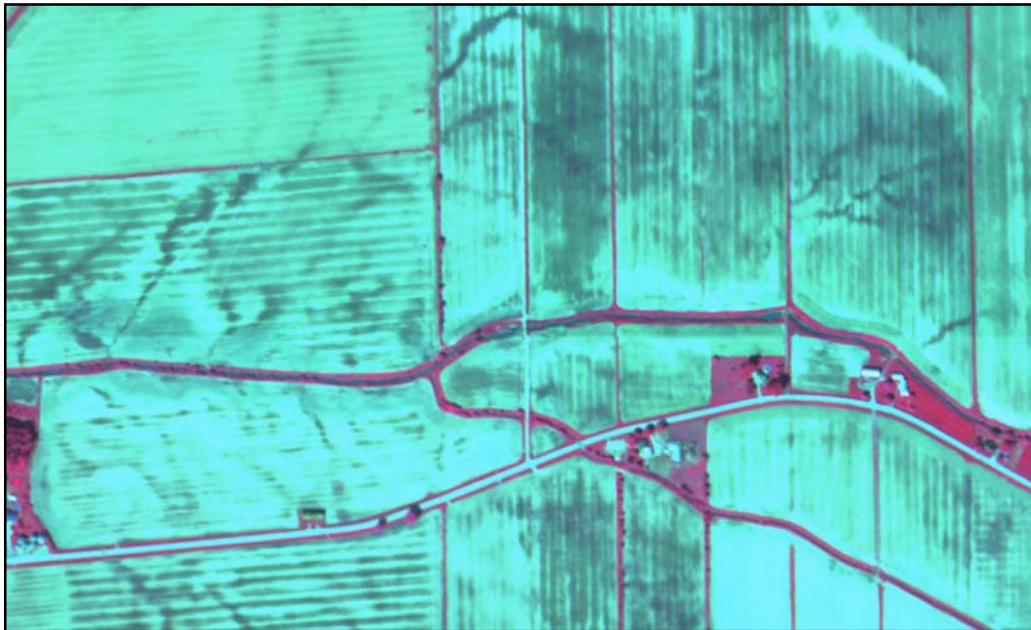


Figure 2: Image composée de fausses couleurs d'une partie du bassin versant du ruisseau Ewing au 31 mai 2006 qui permet de distinguer les patrons spatiaux dans l'égouttement du sol.

2.1.2 Indice d'égouttement du sol

À l'aide des images multispectrales corrigées sur le plan radiométrique, il est possible de calculer un indice d'égouttement du sol. Au plan opérationnel, cet indice peut être associé aux zones les moins productives du parcellaire en raison d'un drainage déficient, ou aux zones vulnérables à l'émission de ruissellement, à l'érosion et aux exportations diffuses de nutriments. Retenons que cet indice est applicable exclusivement aux sols nus. Conséquemment, les zones boisées, les milieux urbains, les prairies et pâturages ont été masqués et n'apparaissent pas dans la couche de l'indice de brillance de l'atlas. L'indice est tributaire de la couleur, de l'humidité, de la texture et de la structure des sols. Dans la présente étude, puisque l'image a été acquise quelques jours après d'importantes précipitations, l'indice met particulièrement en relief les contrastes dans les conditions d'humidité du sol.

L'indice de brillance se calcule comme suit :

$$IB = (PIR^2 + R^2)^{0.5}$$

où : PIR = canal du proche infrarouge; R = canal du rouge.

La figure 3 illustre la distribution spatiale de l'indice de brillance des sols pour l'ensemble du bassin versant du ruisseau Walbridge. L'indice est calculé à partir des mosaïques des images multispectrales orthorectifiées du 31 mai 2006 et corrigées au plan radiométrique. Les zones apparaissant en bleu sont susceptibles de présenter un problème d'égouttement et d'être associées à un important ruissellement de surface. Les zones orangées et rouges correspondent à des surfaces qui s'assèchent plus rapidement après une précipitation. Dans une perspective d'actions concertées sur la prévention de la contamination diffuse de l'eau de surface, l'indice de brillance se révèle ainsi un outil fort utile dans l'identification des zones prioritaires d'intervention.

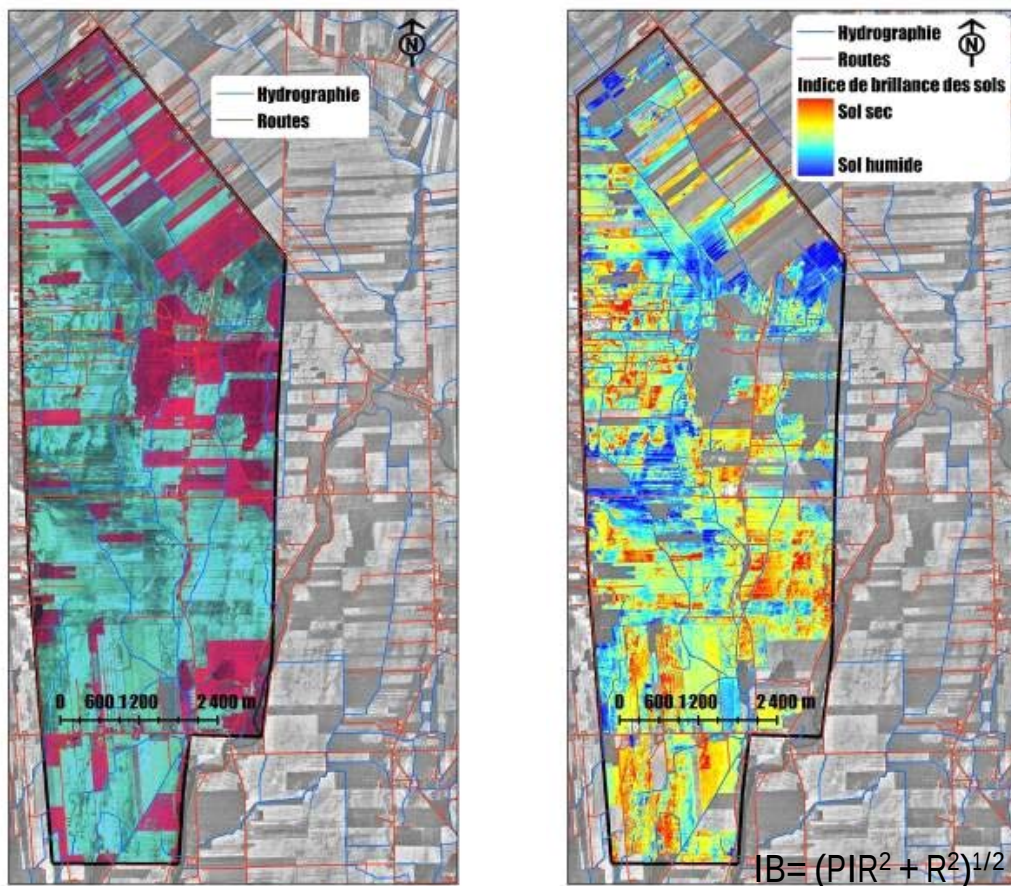


Figure 3: Mosaïque des images multispectrales orthorectifiées du 31 mai 2006 (a) et indice de brillance des sols calculée à partir des mosaïques corrigées au plan radiométrique (b).

2.2 Acquisition et traitement des données LIDAR

2.2.1 Acquisition des relevés aéroportés et prétraitements

Le relevé LiDAR a été acquis le 28 mai 2006 sur un territoire de 50 km² du bassin versant de la rivière Aux Brochets (Figure 4) au moyen du capteur ALTM 2050 à une altitude de 1 200 mètres par l'équipe de Lasermapping Plus. D'une durée de 2 heures, le survol a permis d'acquérir plus de 175 millions de points altimétriques, représentatifs d'une densité moyenne de 2 points/m². Lors du survol, une base GPS a été installée au sol afin de réaliser la correction différentielle des positions du GPS à bord de l'avion. Cette information, combinée à plusieurs autres paramètres de configuration du système d'acquisition (orientations de l'avion fournies par la centrale inertielle, angles du miroir de balayage, etc.), a permis de calculer la position XYZ des échos laser bruts. Ensuite, un ajustement fin entre les lignes de vol a permis d'acquérir une précision variant entre 5 et 15 centimètres en élévation.

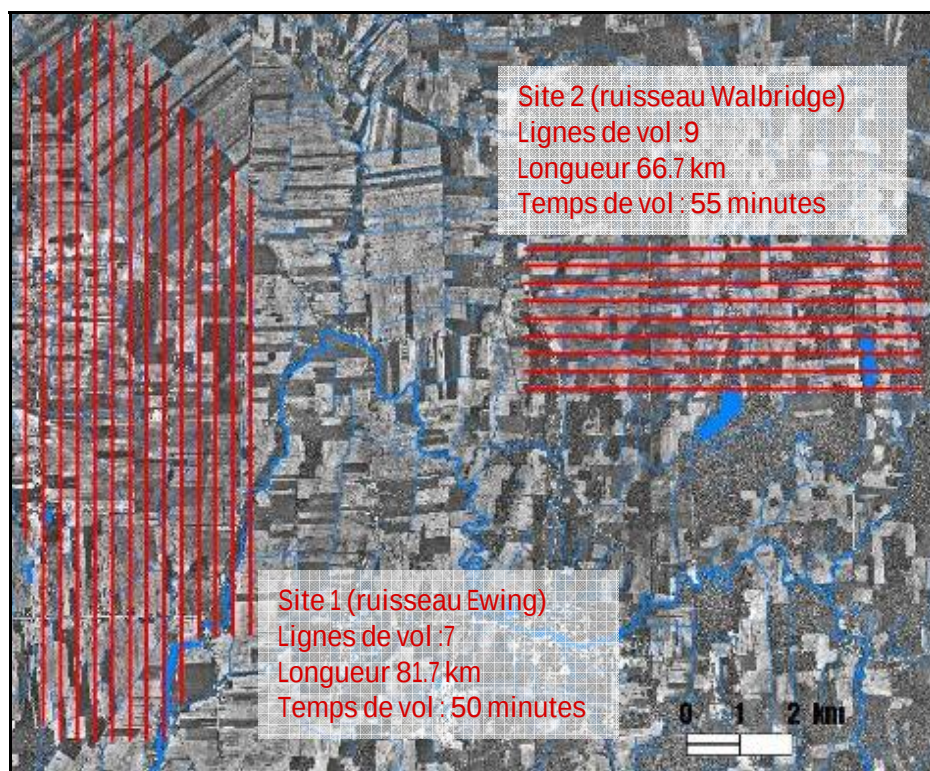


Figure 4 : Lignes de vol associées à l'acquisition aéroportée du relevé LiDAR.

2.2.2 Interpolation des points d'élévation provenant du relevé LIDAR

Une interpolation des données LiDAR a été réalisée afin de dériver des données altimétriques continues et d'en permettre l'analyse hydrologique. L'interpolation spatiale permet, à l'aide de fonctions mathématiques, de créer une surface continue de valeurs à partir de mesures ponctuelles dispersées. Trois ont été comparées dans le cadre du présent projet, soit l'Inverse Distance Weighted (IDW), le *Spline* ou le krigeage. À cette fin, les points d'une tuile de 1 km² ont été séparés aléatoirement en deux sous-échantillons. Le premier, contenant 423 700 points, a été utilisé pour réaliser l'interpolation et le second, comprenant 339 860 points, pour procéder à la validation des matrices résultantes. Le temps de calcul ainsi que les erreurs associées à chacune des méthodes sont décrits au tableau 2. On remarque que le temps de calcul augmente de façon exponentielle avec le degré de complexité de la méthode utilisée sans toutefois avoir un impact significatif sur la précision de l'interpolation. La méthode IDW est très rapide, avec un temps de calcul de 3 minutes pour un territoire de 1 km², comparativement au krigeage qui nécessite 6,5 heures pour créer le MNA avec un gain de précision de 2 mm. La méthode du IDW a donc été retenue pour réaliser l'interpolation des points LiDAR. Avec une densité de ½ point/m², l'erreur d'interpolation est de 3 centimètres. En utilisant la totalité des points du relevé LiDAR (1 point/m²), l'erreur d'interpolation est ainsi présumée inférieure à 3 centimètres. Des essais supplémentaires ont été réalisés afin d'évaluer l'impact du nombre de points voisins utilisés par la méthode IDW. Ce paramètre a été jugé comme étant non-significatif puisque l'impact est inférieur à 1 mm. Les paramètres suggérés par défaut par ArcGIS ont donc été utilisés (12 voisins). Les MNA produits à l'aide de la méthode IDW apparaissent à la figure 5. Sur le bassin du ruisseau Ewing, la topographie est très plane avec des élévations qui varient entre 30 et 59 mètres alors que dans le secteur du ruisseau Walbridge, le terrain est plus ondulé avec des élévations allant de 53 à 103 mètres.

Tableau 2 : Description, temps de calcul et erreur (en valeur absolue) de trois méthodes d'interpolation qui ont été testés pour créer un MNA sur une tuile de 1 km²

Méthode	Description	Temps	Erreur (cm)
IDW	Cette méthode détermine la valeur des cellules en calculant une moyenne pondérée à partir des valeurs des points du voisinage. La pondération est inversement proportionnelle à la distance séparant le centre de la cellule des points du voisinage. Pour avoir un bon résultat il faut un échantillon suffisamment dense et ce en fonction des variations locales. Les paramètres par défaut suivants ont été utilisés :		
	Puissance = 2, rayon de recherche variable avec les 12 plus proches voisins;		3,28
	Puissance = 2, rayon de recherche variable avec les 8 plus proches voisins;	0,05 h	3,23
	Puissance = 2, rayon de recherche variable avec les 6 plus proches voisins.	(3 min.)	3,22
Spline	Cette méthode consiste à faire passer une ligne par les points de voisinage tout en minimisant la courbure de la surface (fonction mathématique équation de surface). Le voisinage est défini par les n points les plus proches. Cette méthode est particulièrement adaptée aux surfaces sur lesquelles les variations sont peu importantes. Les paramètres par défaut ont été utilisés (Spline de type régularisé, poids = 0,1, $n = 12$).	0,5 h	3,89
Kriging	Une interpolation de type krigage suppose l'hypothèse que les données viennent d'un phénomène aléatoire que l'on essaie d'identifier et que l'on caractérise par des lois de distribution (par exemple le variogramme). C'est une approche probabiliste. L'intérêt d'une telle méthode est l'estimation des valeurs mais aussi la connaissance de l'erreur induite par la création de la grille de prédiction. Les paramètres par défaut ont été utilisés (sphérique ordinaire avec les 12 plus proches voisins).	6,5 h	3,04

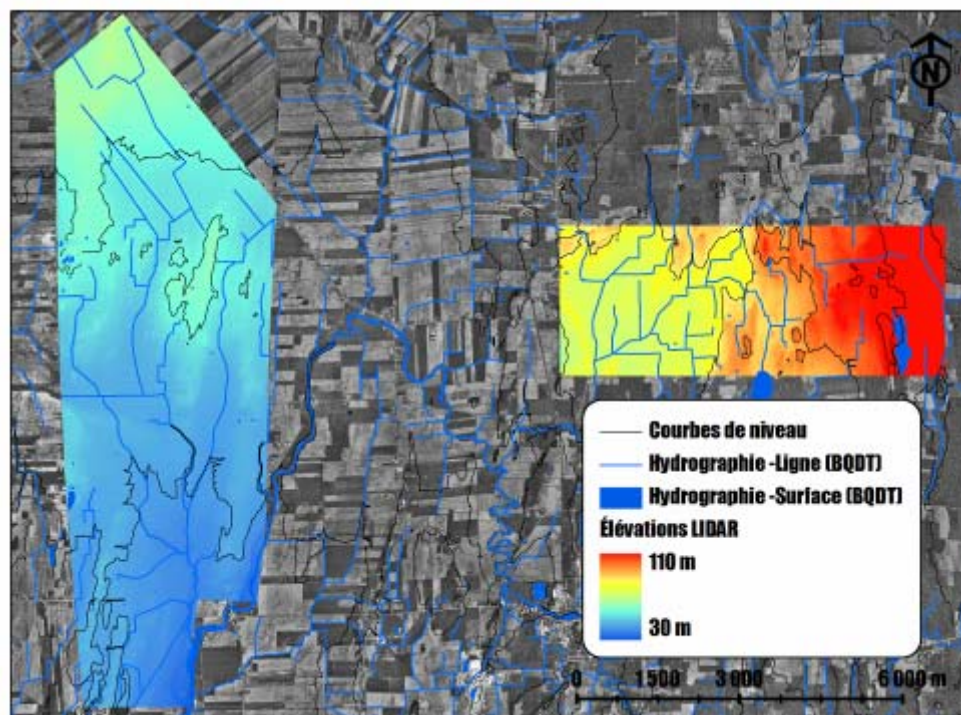


Figure 5 : Modèles numériques d'altitudes produits à l'aide de la méthode IDW sur des pixels d'un demi-mètre de résolution.

2.2.3 Évaluation de la précision des données LIDAR

La précision du relevé LiDAR a été évaluée sur la base d'un relevé acquis par des capteurs GPS embarqués sur des véhicules tout-terrain (VTT) en 2001 sur le territoire du bassin du ruisseau Walbridge dans le cadre du projet « Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles » (Michaud et coll., 2004). La superficie couverte par ce relevé est de 307 hectares, avec un recouvrement du MNA/LiDAR de 23 hectares. La soustraction matricielle des deux MNA, issue du GPS - VTT et du LiDAR, révèle une erreur moyenne absolue de 13 cm. Néanmoins, l'examen visuel de la matrice des différences relatives (Figure 6) met en évidence une erreur d'ajustement altimétrique entre les différentes zones du relevé GPS-VTT. Cette différence s'explique par le fait que le MNA GPS-VTT a été constitué à partir de plusieurs relevés qui ont été acquis séparément puis « raccrochés » au réseau géodésique. Ceci a induit une erreur altimétrique absolue entre les différents relevés GPS-VTT. Précisons que pris individuellement, les points de chaque relevé GPS-VTT sont cohérents entre eux, mais qu'entre les relevés, une erreur constante a été introduite lors du « raccrochage » au réseau géodésique. Des comparaisons des MNA ont aussi été réalisées sur deux secteurs distincts relevés par GPS-VTT (Figure 6), soit la zone A, où l'élévation du MNA LiDAR est généralement plus importante que celle du MNA GPS-VTT, et la zone B où le contraire est observé. Les erreurs moyennes absolues se situent alors à 11 et 7 cm pour les secteurs A et B respectivement. Rappelons cependant qu'une période de 6 ans sépare l'acquisition des deux relevés. Des travaux d'aménagement foncier et les pratiques culturales ont pu influencer le modelé du terrain. La comparaison des relevés (Figure 6d) témoigne notamment de travaux de nivellement réalisés depuis 2001.

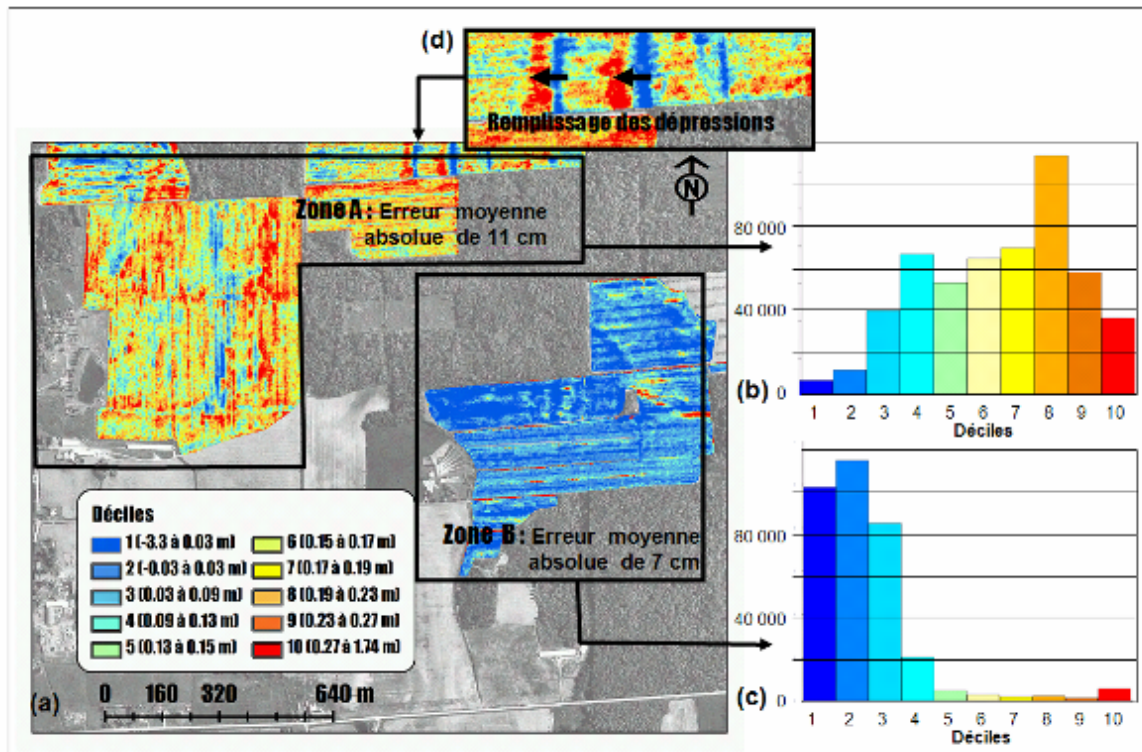


Figure 6 : Matrice des erreurs altimétriques moyennes absolues des MNA LiDAR et MNA GPS-VTT (a), et histogrammes des erreurs absolues de la zone A (b) et de la zone B (c).

La comparaison des parcours de l'eau et des micro-bassins modélisés à partir des MNA LiDAR et GPS-VTT révèle que ces derniers sont pratiquement identiques (Figure 7), malgré les différences observées entre les 2 MNA. Les parcours de l'eau dérivés du MNA LiDAR apparaissent moins rectilignes que ceux extraits du MNA GPS-VTT, ce qui est probablement attribuable au patron de circulation des VTT. En effet, la densité des points GPS-VTT est généralement plus importante dans les lignes de passage du VTT, alors qu'environ 5 à 10 mètres séparent les passages de VTT (Figure 8). Les MNA produits par GPS-VTT présentent ainsi une apparence plus lisse et des parcours de l'eau moins sinueux qu'avec le LiDAR.

Les micro-bassins générés par les deux méthodes sont cohérents et fort semblables. Les micro-bassins extraits du MNA GPS-VTT apparaissent cependant plus agrégés. Les effets de la précision, de la densité des relevés ou des déplacements de sol associés aux travaux aratoires au cours des six années séparant le captage des données, se confondent et ne peuvent être distingués. La cohérence des relevés et une différence moyenne et absolue entre 7 et 11 cm témoignent cependant d'une grande précision du MNA généré par le relevé LiDAR. Cette précision demeure adaptée à la réalisation de diagnostics précis de l'égouttement de surface et à la conception de structures de contrôle du ruissellement de surface pour le type de relief associé au territoire à l'étude. La prudence serait cependant de mise dans l'application systématique du relevé LiDAR dans le nivellement au laser de haute précision du parcellaire pour des reliefs plus plats.

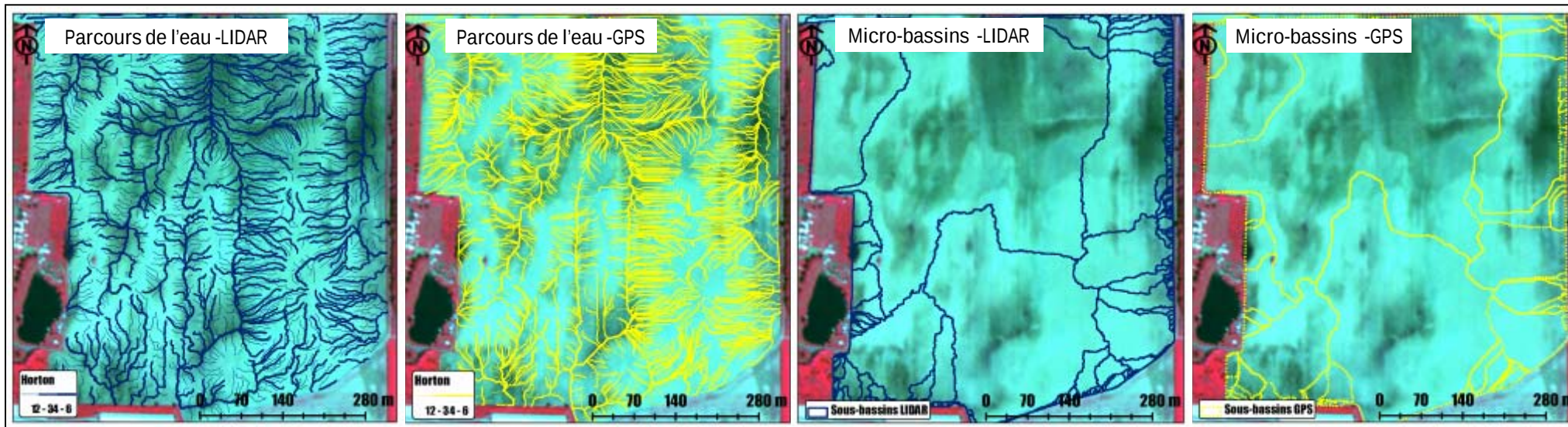


Figure 7 : Parcours de l'eau et micro-bassins modélisés à partir du MNA LiDAR et du MNA GPS-VTT

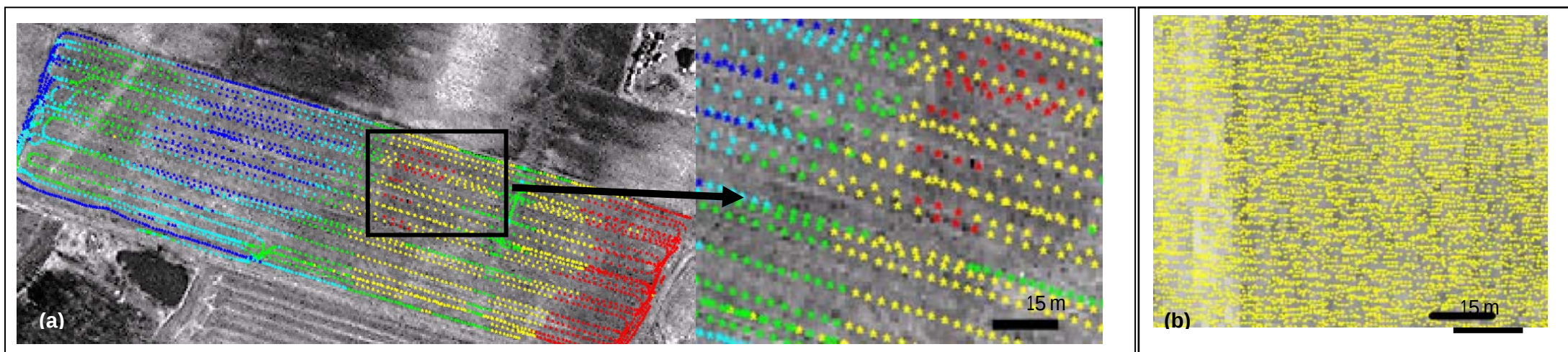


Figure 8 : Exemple de la répartition spatiale et de la densité des relevés altimétriques par GPS-VTT (a) et LiDAR (b).

2.2.4 Modélisation des patrons d'écoulement du ruissellement de surface, des sous-bassins et des dépressions

Les patrons d'écoulement de l'eau (Figure 9a), les micro-bassins (9b), les dépressions (9c), les courbes de niveau à une équidistance de 50 centimètres (9d), les pentes et divers indices topographiques ont été produits sur la base du modèle numérique d'altitude à l'aide du module WATERSHED du logiciel TNTMIPS.

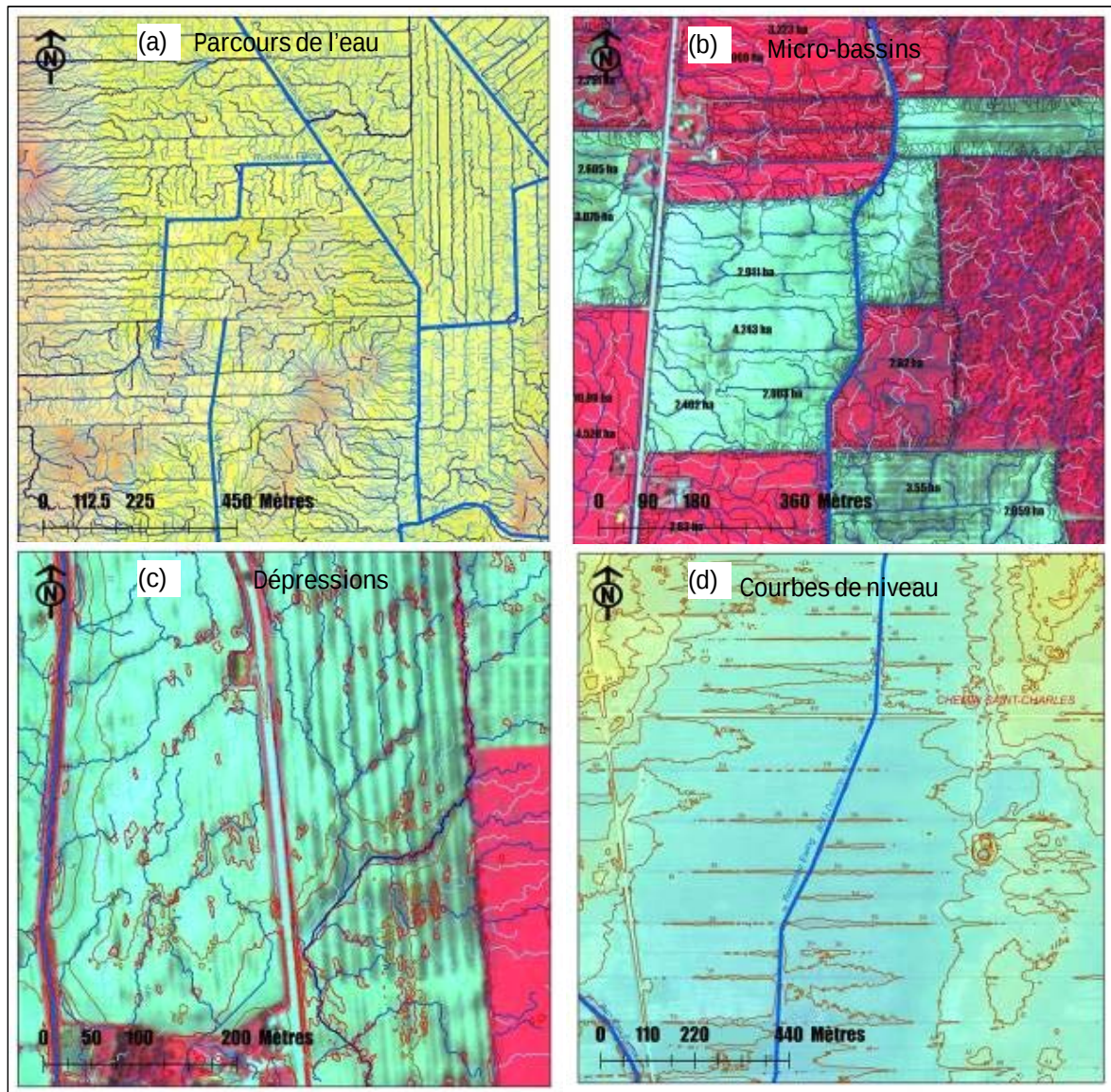


Figure 9 : Les parcours de l'eau (a), les micro-bassins des champs (b), les dépressions (c) et les courbes de niveau à une équidistance de 50 centimètres (d) dérivées du modèle numérique d'altitude produit avec les données LiDAR.

À priori, le découpage hydrologique initial du parcellaire réalisé à l'aide de TNTMIPS n'était pas adapté au support à l'aménagement hydro-agricole des champs. Dans certains cas, le découpage initial dérivait en effet des micro-bassins versants d'une superficie trop grande, qui ne permettait pas de caractériser l'hydrologie intra-parcellaire (Figure 10a). Par ailleurs, la génération de micro-bassins trop segmentés et non-structurés limitait l'analyse hydrologique à l'échelle du champ (Figure 10b). Conséquemment, différents essais ont été réalisés afin d'améliorer le découpage hydrologique. Divers seuils régissant la segmentation hydrologique dans TNTMIPS ont d'abord été testés sans résultats probants. Une approche fondée sur la conception de masques a donc été développée pour restreindre les parcours de l'eau aux

limites des champs. Deux types de masque ont été utilisés. Un premier, développé afin de dériver les micro-bassins versants, comprend des zones tampon de 10 mètres de part et d'autre des routes et de un mètre autour des cours d'eau. Ce masque a permis de bien définir l'influence des fossés et des raies de curage (Figure 10c) sur l'écoulement de surface. Un deuxième masque utilise les limites des champs agricoles afin de cerner la variabilité intra-parcellaire de l'écoulement de l'eau et de délimiter les micro-sous-bassins des champs (Figure 10d).

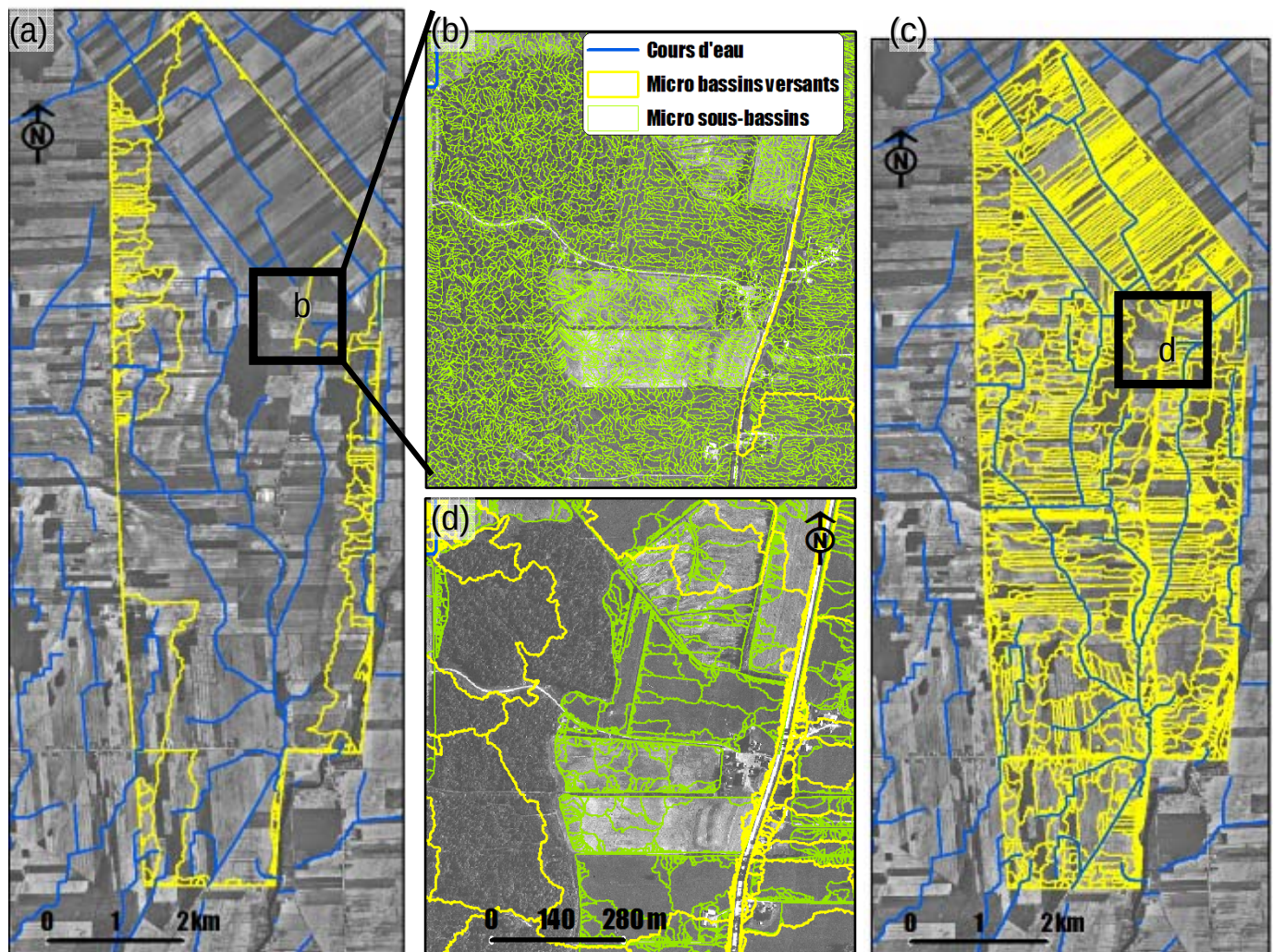


Figure 10 : Segmentation hydrologique produite par TNTMIPS avec les paramètres définis par défaut (a)-(b), avec le masque du réseau hydrographique et routier (c) et en fonction des limites des champs agricoles (d).

La représentation intra-parcellaire finale de l'écoulement de surface dérivée du MNA-LiDAR permet d'interpréter le fonctionnement hydrologique du bassin versant. La classification et l'interprétation des propriétés des micro-bassins du ruisseau Ewing mettent notamment en relief que la configuration cadastrale étroite et allongée du parcellaire favorise la concentration des parcours de l'eau à la surface des champs. Ainsi, 40 % des micro-bassins versants du ruisseau Ewing possèdent une superficie supérieure à 5 hectares (Figure 11a). Cette concentration des eaux de ruissellement favorise la capacité de transport des sédiments et des nutriments par l'eau de ruissellement. Par ailleurs, 55 % de la superficie du parcellaire se draine vers les fossés (Figure 11b), d'où l'importance de privilégier l'implantation de structures de captage au champ ou aux exutoires des fossés afin de favoriser le laminage des crues et la sédimentation au champ. L'implantation de bandes riveraines conserve toutefois sa pertinence, dans la mesure où 45 % de la superficie globale des micro-bassins versants du ruisseau Ewing s'y écoulent directement. Les patrons diversifiés de l'écoulement de surface dans le bassin du ruisseau Ewing témoignent ainsi de la complémentarité des bandes riveraines et des structures de contrôle en vue d'atténuer les exportations diffuses associées au ruissellement de surface.

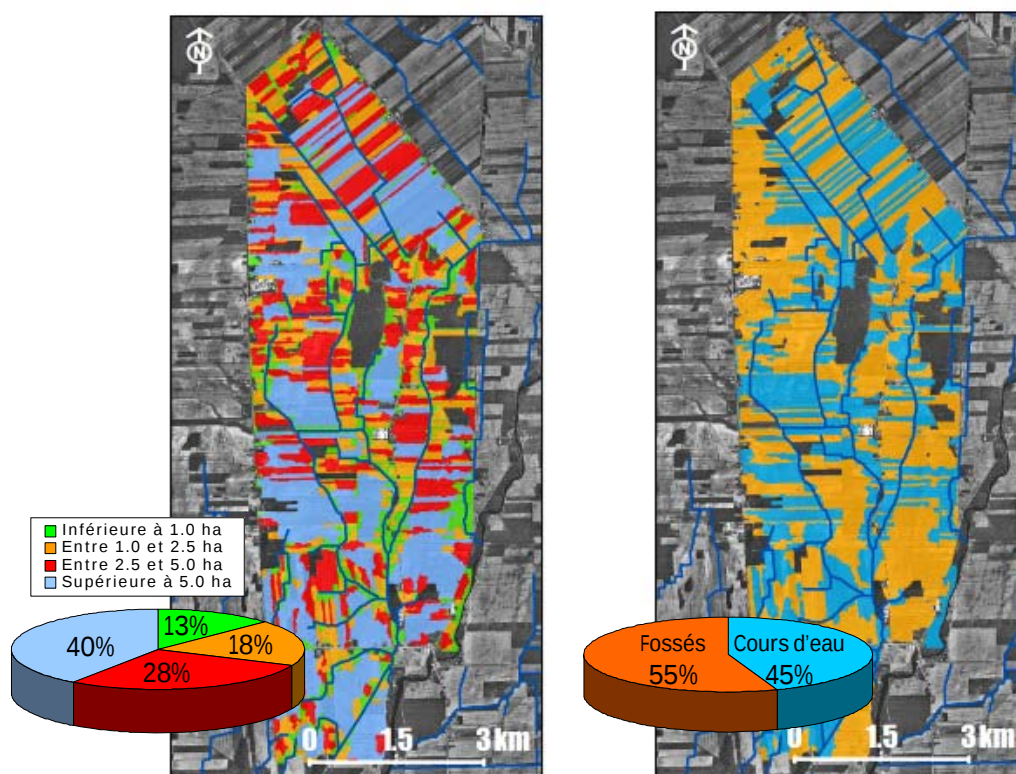


Figure 11 : Classification des micro-bassins versants du ruisseau Ewing réalisée en fonction de leur superficie (a) et en fonction de leurs exutoires localisés soit aux fossés ou directement au cours d'eau (b)

2.3 Dimensionnement des structures de contrôle du ruissellement

Les structures de contrôle du ruissellement tempèrent l'évacuation du ruissellement aux exutoires des champs et favorisent la sédimentation des matières en suspension charriées dans l'eau de surface avant que celles-ci n'atteignent le cours d'eau. La conception de ces petites structures est basée sur deux critères principaux, soit l'évaluation du temps de concentration et le débit de pointe. Une approche automatisée permettant le calcul de ces paramètres de conception a été développée dans le cadre du présent projet et systématiquement appliquée aux micro-bassins des ruisseaux Ewing et Walbridge. La méthode met à profit le modèle numérique d'altitude (MNA) généré par la couverture LiDAR de même que les données pédologiques disponibles en format électronique. L'approche retenue est en tous points conforme aux recommandations techniques de la fiche « Évaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants agricoles du Québec » préparée par Stämpfli et coll. (2007a) à l'intention des services conseils en agrosystème.

2.3.1 Évaluation du temps de concentration

Le temps de concentration représente le délai entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire d'un bassin versant donné. Deux méthodes sont proposées par Stämpfli et coll. (2007a) pour estimer le temps de concentration dans de petits bassins versants agricoles, soit la méthode de Kirpich (équation 1) et celle de Mockus (équation 2) :

<u>Méthode de Kirpich</u>	<u>Méthode de Mockus</u>
$T_c = \frac{0.000325 * L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad [1]$	$T_c = \frac{L^{0.8} * \left[\frac{1000}{NC} - 9 \right]^{1.67}}{2083 * (1000 * S)^{0.5}} \quad [2]$
où T_c : Temps de concentration (heures) L : Longueur maximale du parcours de l'eau (mètres) S : Pente longitudinale moyenne du bassin versant calculée à des points (mètre/mètre) situés à 10 et 85 % de <i>L</i> en partant du point le plus loin de l'exutoire. NC : Numéro de courbe (nécessaire pour Mockus seulement, voir annexe A).	

Pour l'ensemble des micro-bassins de 0,2 ha et plus du bassin versant du ruisseau Ewing, les temps de concentration ont été évalués à l'aide de ces 2 méthodes. La longueur maximale et les pentes longitudinale et transversale moyennes ont été calculées à l'aide du MNA-LiDAR. La méthodologie développée pour calculer ces paramètres relève de manipulations de données plutôt complexes. Une présentation détaillée de la méthodologie est présentée à l'annexe A.

La méthode de Mockus implique l'attribution d'un groupe hydrologique à l'aide des données pédologiques. Le classement des sols dans un groupe hydrologique rassemble les sols ayant des potentiels similaires de ruissellement lorsqu'ils sont soumis à des climats semblables. Ce classement est normalement basé sur des mesures d'infiltration et de transmission de l'eau sous des conditions maximales d'humidité (capacité de rétention au champ) lorsque le sol est sans végétation et non gelé.

Le classement des sols dans un groupe hydrologique donné est déterminé par la couche de sol ayant la plus faible conductivité hydraulique saturée et par la profondeur à une couche de sol plus ou moins imperméable² à l'eau (roc, fragipan ou autres) ou par la profondeur de la nappe, si celle-ci est présente. C'est la couche la moins perméable qui détermine le groupe. La classification du **groupe hydrologique** du sol proposée par Michaud et coll. (2008) a été appliquée au parcellaire du territoire à l'étude :

- **Groupe A** : Ce groupe comprend les sols possédant un taux d'infiltration élevé même lorsqu'ils sont saturés en eau. Typiquement, la texture de ces sols est grossière et ils sont très rapidement à rapidement drainés. Ces sols possèdent une conductivité hydraulique élevée qui est associée à un faible potentiel de ruissellement;
- **Groupe B** : Ce groupe inclut les sols possédant un taux d'infiltration modéré lorsqu'ils sont saturés. Typiquement, la texture de ces sols, bien à modérément bien drainés, varie de fine à moyennement grossière. Ces sols présentent un taux de transmission de l'eau et un potentiel de ruissellement modérément faible;
- **Groupe C** : Ce groupe de sol est caractérisé par un taux d'infiltration lent, possédant une couche qui empêche le mouvement de l'eau vers le bas ou ayant typiquement une texture très fine. Ces sols présentent une conductivité hydraulique lente et ils sont associés à un potentiel modérément élevé de ruissellement;
- **Groupe D** : Ce groupe comprend les sols ayant un taux d'infiltration très lent lorsqu'ils sont saturés. Le groupe D comprend principalement des argiles qui sont pourvues d'une nappe d'eau près de la surface. Ces sols présentent un potentiel élevé de ruissellement.

² Selon la définition de l'USDA-NRCS, une couche est dite imperméable si la conductivité hydraulique saturée est inférieure à 0,32 cm/hr.

Pour les fins du présent atlas, seul le groupe hydrologique dominant de chaque micro-bassin a été retenu pour les fins des calculs hydrologiques. Retenons enfin que seule la classe de "culture intensive" a été retenue comme utilisation du sol dans l'estimation des numéros de courbe (NC) pour l'ensemble du territoire en culture. Les superficies boisées ont également été évaluées et une moyenne pondérée des NC a alors été calculée en fonction de la répartition de l'utilisation du sol des micro-bassins.

2.3.2 Évaluation du débit de pointe

L'estimation du débit de pointe est conforme à la méthodologie proposée par Stämpfli, et coll. (2007a). Le débit de pointe correspond au débit maximal à l'exutoire d'un bassin versant pendant et/ou juste après une pluie de forte intensité. Celui-ci est évalué par la méthode rationnelle (Akan, 2002) qui est définie comme suit :

$$Q_p = \frac{C \times I_p \times A}{360}$$

Où : Q_p : Débit de pointe du bassin versant (m³/s);
C : Coefficient de ruissellement correspondant à la fraction de l'eau qui ruisselle par rapport au total précipité (m³/s);
 I_p : Intensité de la précipitation d'une durée égale au temps de concentration (mm/h);
A : Superficie du bassin versant (ha).

Le coefficient de ruissellement **C** a été évalué en fonction de la texture du sol dominant des micro-bassins, de leurs pentes transversales et de leurs utilisations du sol. Une récurrence de la pluie de 10 ans a été utilisée. De plus, la durée de la précipitation a été considérée comme étant égale au temps de concentration et déterminée sur la base de la distribution proposée par Environnement Canada, telle que présentée dans la fiche technique de Stämpfli et coll. (2007a).

2.3.3 Évaluation des débits maximaux des structures

Les débits maximaux des structures associés à chacun des micro-bassins du ruisseau Ewing ont été déterminés selon l'équation suivante :

$$Q_m = Q_p - \sqrt{\frac{V_b \times Q_p}{3600 \times T_c}} \quad [3]$$

Où : Q_p : Débit de pointe du bassin versant (m³/s);
 Q_m : Débit maximal de la structure (m³/s);
 V_b : Volume de rétention du bassin (m³);
 V_r : Volume ruisselé (m³);
 T_c : Temps de concentration (heures).

Divers scénarios de rétention ont été évalués et inclus dans la base de données des micro-bassins de l'atlas électronique, permettant de concevoir des bassins de captage et de sédimentation pouvant retenir des volumes variables d'eau (5 m³, 10, 20, 50, 75, 100, 200, 300, 500 et 1000 m³). En s'appuyant sur ces différents scénarios de volume de captage et la prise en compte des caractéristiques du terrain, il devient alors possible d'évaluer la taille de la structure à implanter selon la méthodologie proposée par Stämpfli et coll. (2007b) dans leur fiche technique Calculs pour le dimensionnement des avaloirs.

Dans l'atlas électronique du bassin du ruisseau Ewing, les données pertinentes au dimensionnement des structures de contrôle du ruissellement ont été intégrées à la couche d'information Bassin-dimensionnement (Figure 12). Celle-ci contient l'ensemble des informations pertinentes au dimensionnement de petites structures agricoles, soit les pentes longitudinale et transversale, la superficie du micro-bassin, le sol dominant ainsi que son groupe hydrologique, de même que les superficies boisées drainées par le micro-bassin. Les temps de concentration et les débits maximaux associés aux différents scénarios de volume de captage de rétention ont également été intégrés dans l'atlas (Figure 12). Il est suggéré d'utiliser les résultats modélisés dans l'atlas de concert avec l'approche énoncée dans la fiche technique Calculs pour le dimensionnement des avaloirs (Stämpfli et coll., 2007b). Une visite sur le terrain est également essentielle afin de valider visuellement le parcours de l'eau défini

par l'analyse hydrologique du MNA-LiDAR. Il est également nécessaire de déterminer sur le terrain l'emplacement de l'avaloir et d'évaluer le volume du bassin de rétention qu'il est possible d'implanter en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque site. La couche d'information Bassin-dimensionnement intégrée à l'atlas électronique devrait faciliter le dimensionnement de structures hydro-agricoles, puisqu'elle contient toutes les informations nécessaires à l'élaboration d'un diagnostic adapté aux conditions particulières du terrain. Elle est actuellement mise à la disposition des intervenants du milieu.

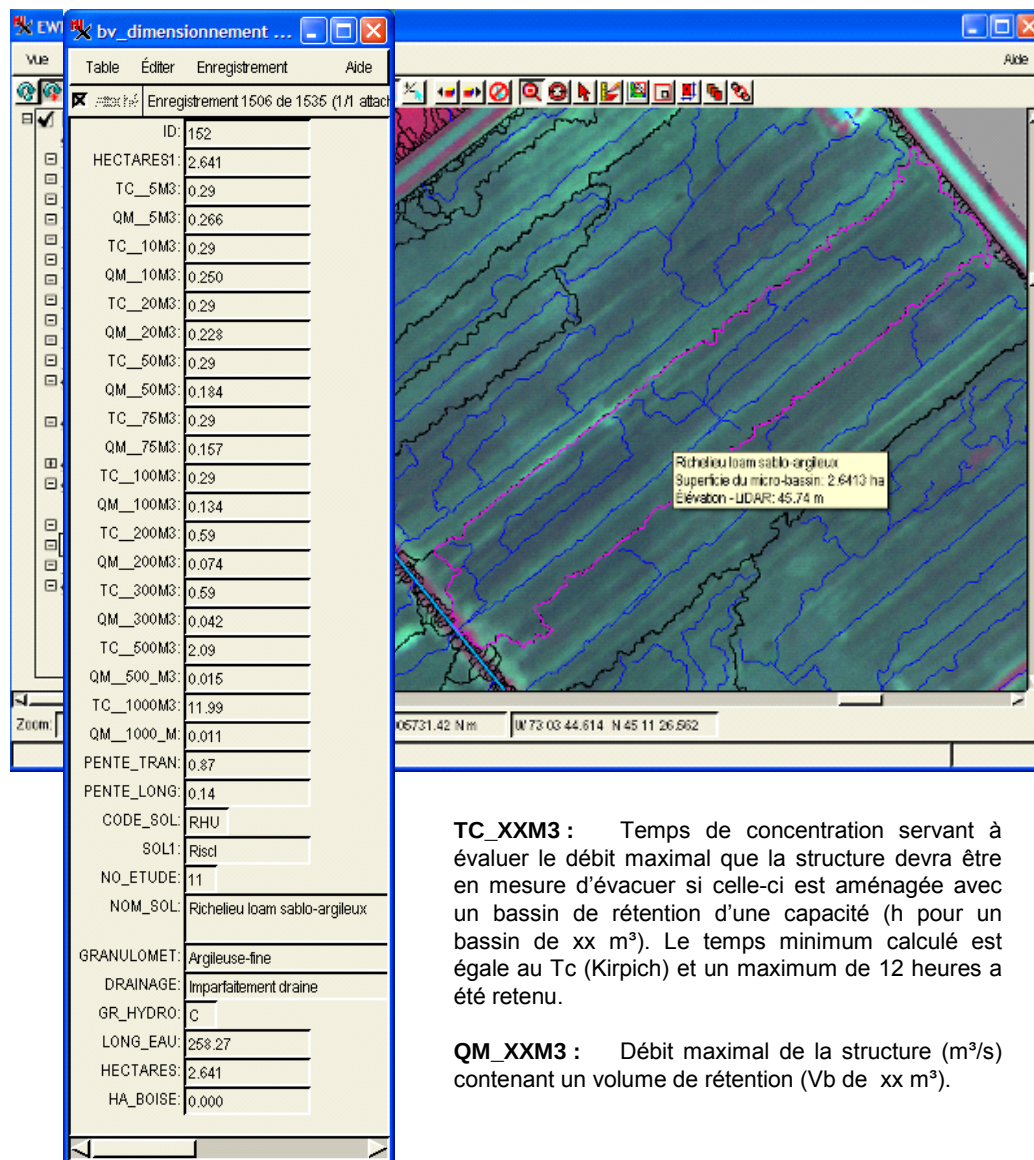


Figure 12 : Image de la couche d'information Bassin-dimensionnement de l'atlas électronique associée à chacun des micro-bassins des ruisseaux Ewing et Walbridge, incluant l'ensemble des informations pertinentes au dimensionnement de petites structures agricoles selon différents scénarios de volume de captage.

2.4 Cartographie du risque d'érosion et de pollution diffuse

Dans un cadre d'actions concertées sur la qualité de l'eau, la cartographie du risque d'érosion et de pollution diffuse est destinée à supporter l'établissement de priorités et le ciblage des interventions à l'échelle du bassin versant. La méthodologie développée dans le cadre du projet GRISE s'est appuyée sur différents paramètres dérivés du relevé LiDAR et les données pédologiques afin de produire des prédictions du taux d'érosion annuel moyen pour chacun des micro-bassins des ruisseaux Ewing et

Walbridge. Les prédictions ont été calculées sur la base de l'équation universelle de perte de sol modifiée (MUSLE; Williams, 1975) qui estime la perte de sol en fonction de la hauteur totale et de l'intensité de pointe du ruissellement de surface, des propriétés du sol, de la topographie et de la couverture végétale :

$$MUSLE = 11,8(Q_{surf} * q_{max} * SUP_{bassin})^{0,56} * K * C * LS * P \quad [\text{tonnes}] \quad [4]$$

où :

Q_{surf}	Est le ruissellement journalier du micro-bassin (mm/ha);
q_{max}	Correspond au taux d'écoulement de pointe (m^3/s) évalué sur une base journalière à l'échelle du micro-bassin;
SUP_{bassin}	Est l'aire du micro-bassin (ha) sur lequel l'érosion est comptabilisée;
K	Est le facteur d'érodabilité du sol ($0,013 \text{ tonne } m^2 \text{ h/m}^3 \text{ tonne cm}$). Le facteur K est une mesure quantitative de la sensibilité ou de la résistance inhérente d'un sol à l'érosion. Ce facteur varie selon la texture, la structure du sol et la teneur en matière organique. Les métadonnées relatives à l'érodabilité du sol sont fournies avec l'atlas électronique;
C	Est le facteur de couverture végétale du sol. Le facteur C est une mesure de l'efficacité relative de la pratique culturale dans la prévention ou la réduction de la perte de sol. Ce facteur varie selon : la couverture végétale aérienne (feuilles et branches qui interceptent les gouttes de pluie et dissipent une partie de leur force érosive); la végétation au sol (résidus de culture et végétation vivante à la surface du sol) et; le travail du sol (type, période et fréquence de travail du sol). Dans cette étude, le facteur C de référence utilisé correspond à une culture de maïs avec un labour à l'automne et un travail secondaire au printemps;
LS	Est le facteur topographique. Le facteur LS est une mesure des effets de l'inclinaison et de la longueur de la pente sur l'érosion. À l'échelle du micro-bassin, la pente a été évaluée en considérant l'élévation des points localisés à 15 et 90 % de l'exutoire du parcours principal de l'eau;
P	Le facteur P est une mesure des effets des pratiques visant à modifier le profil, la pente ou la direction de l'écoulement du ruissellement afin de réduire l'érosion. Les pratiques courantes sont le labour en travers de la pente, le labour selon le contour des pentes, la culture en bandes alternantes, l'aménagement de terrasses et l'aménagement de voies d'eau engazonnées. Dans la présente étude, ce facteur a été fixé à 1 afin de reproduire des conditions où aucune de ces pratiques n'est appliquée.

Le taux de ruissellement de pointe a été calculé avec la formule rationnelle (Akan, 2002) et le ruissellement selon l'équation du numéro de courbe SCS (USDA-SCS, 1972). Dans la présente étude, l'évaluation du ruissellement journalier et du débit de pointe s'est appuyée sur des modélisations hydrologiques complexes réalisées et validées dans le bassin versant de la rivière Aux Brochets (Michaud et coll., 2006) à l'aide du modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et coll., 2005). Les paramètres hydrologiques journaliers de l'équation 4 ont ainsi été extraits, par type de sol, des modélisations réalisées sur le bassin de la rivière Aux Brochets. Cette approche est possible puisque la climatologie de ces deux sites est identique. L'érosion annuelle ainsi évaluée est une moyenne sur 4 ans (2000-2003). Cette période correspond aux années pendant lesquelles le modèle SWAT a été calibré et validé sur la base de mesures en bassins versants expérimentaux (Michaud et coll., 2006).

Rappelons que les prédictions de perte de sol incluses dans l'atlas du bassin versant du ruisseau Ewing sont cohérentes avec les estimations dérivées de l'utilitaire informatique Outil diagnostique des exportations de phosphore (ODEP; Michaud et coll., 2008). Cet utilitaire informatique, développé au cours de la même période que le projet GRISE, comprend notamment un module permettant d'estimer l'exportation nette de sédiments à l'échelle des champs pour différentes régions des sols et des cultures. Au plan opérationnel, l'atlas électronique, issu du projet GRISE et distribué aux conseillers agricoles de la région d'étude, est complémentaire à l'utilitaire ODEP, en fournissant les données pertinentes aux propriétés du sol et à la topographie du parcellaire.

La figure 13 illustre la distribution spatiale des prédictions d'érosion annuelle moyenne produites sur la base de l'équation universelle de perte de sol modifiée (MUSLE) pour l'ensemble des micro-bassins d'une superficie supérieure à 0,2 ha des zones d'étude. Ces prédictions traduisent la vulnérabilité intrinsèque du paysage au processus d'érosion, puisqu'elles ont été produites sur la base d'une utilisation du sol et une pratique culturale de référence unique, soit un scénario de culture de maïs grain avec labour d'automne et travail secondaire du sol au printemps. Elles expriment ainsi la vulnérabilité induite

par le relief, les propriétés du sol et la puissance érosive des événements pluvieux de la région à l'étude. Il est à noter que pour cet exercice, même les forêts ont été considérées comme étant des superficies en maïs. L'utilisateur de l'atlas peut générer des prédictions de taux d'érosion, voire d'exportations de phosphore selon une multitude de scénarios de culture, de pratique culturale et de régie des fertilisants en ayant recours à l'utilitaire convivial ODEP (Michaud et coll., 2008).

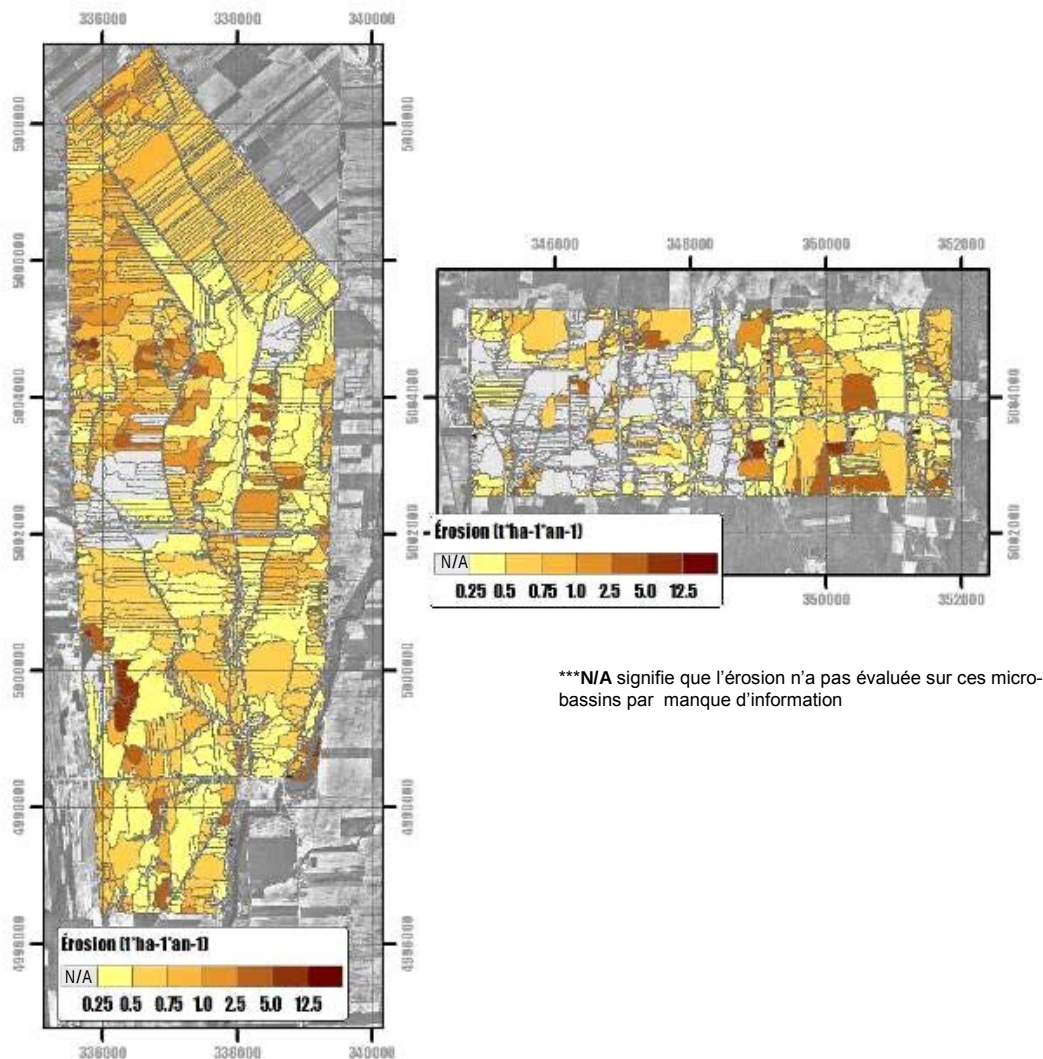


Figure 13 : Cartographie des risques d'érosion réalisée sur l'ensemble des micro-bassins des ruisseaux Ewing Walbridge d'une superficie supérieure à 0,2 hectare.

Globalement, les taux prédits d'érosion demeurent relativement modestes. Considérant une culture de maïs sur les 4 652 hectares caractérisés, environ 1 850 tonnes de sédiments atteindraient le réseau hydrographique par le biais du transport diffus. Ainsi, la perte moyenne nette se chiffrerait annuellement à environ 0,4 tonne de sédiments par hectare. Globalement, les prédictions expriment qu'environ 10 % du territoire contribuerait pour plus de 40 % des exportations diffuses de sédiments, avec des pertes maximales pouvant atteindre jusqu'à 12 tonnes par hectare. Les portions particulièrement vulnérables du parcellaire sont caractérisées par des sols mal drainés à imparfaitement drainés, représentant respectivement 33 et 50 % des micro-bassins concernés. Les deux tiers de ces micro-bassins présentant la vulnérabilité la plus élevée sont associés à des textures argileuses et loameuses fines avec une pente moyenne de 2,2 %.

Il est à noter que les estimations produites dans cet exercice ne considèrent pas les phénomènes érosifs ponctuels tels que les décrochements de talus et les rigoles. De plus, les sols identifiés comme étant organiques sur la carte pédologique n'ont pas été caractérisés puisque nous ne disposons pas de méthode validée pour évaluer l'érodabilité de ces sols. Conséquemment, les micro-bassins dont le sol dominant est organique sont représentés en grisé dans l'atlas et à la figure 13.

2.5 Segmentation du paysage en zones hydropédologiques

À l'instar de l'ensemble du terroir québécois, les sols de la région à l'étude sont relativement jeunes et présentent d'importantes variabilités dans leurs propriétés en raison des différents matériaux originels et processus à l'œuvre lors de leur formation. Cette variabilité est amplifiée par le cadastre allongé et étroit des parcelles en culture, généralement parallèle au gradient de la pente. La régie des sols et des cultures étant généralement homogène à l'échelle de la parcelle; la variabilité des propriétés des sols n'est donc généralement pas prise en compte par les gestionnaires des entreprises agricoles. Peu d'entreprises disposent en effet de données pédologiques suffisamment précises pour moduler la régie des sols et des cultures à l'échelle d'un même champ. Le coût relativement élevé associé à ce type d'inventaire pédologique (> 50 \$/ha) limite l'implantation de la gestion localisée du parcellaire.

En alternative à la prospection pédologique intra-parcellaire, plusieurs approches de caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés du sol sont proposées aux entreprises agricoles québécoises. En appui à l'application d'intrants à taux variable, l'industrie offre depuis plusieurs années une cartographie des taux de richesse des sols, basée généralement sur un taux d'échantillonnage ponctuel d'un prélèvement à l'hectare. Les recherches menées au Québec ont cependant démontré que cette densité d'échantillonnage s'avérait parfois insuffisante dans plusieurs régions du Québec (Michaud et coll., 2003; Nolin et coll., 2000; Savoie et Brunelle, 2000). La correction localisée de pH des sols, appuyée par un captage de la conductivité électrique des sols au moyen de capteurs embarqués, est aussi offerte par l'industrie aux entreprises agricoles depuis plusieurs années. L'approche proposée reflète l'état des connaissances québécoises quant au potentiel de la conductivité électrique du sol à traduire la variabilité spatiale des propriétés des sols. La technique rencontre cependant les mêmes limitations que celles associées aux autres capteurs embarqués, soit le coût relativement élevé et les courtes fenêtres de temps propice à la circulation au champ en raison du calendrier des opérations culturales.

Le recours aux données d'élévation acquises par télédétection constitue une troisième voie dans la reconnaissance de la variabilité spatiale des propriétés du sol. En effet, le relief traduit généralement la localisation des dépôts meubles, le drainage et les processus qui ont donné naissance aux sols. En parallèle à ses applications en matière de diagnostic de l'égouttement, le projet GRISE a évalué une approche de cartographie de la variabilité des types de sol fondée sur l'analyse spatiale du relief généré par les observations LiDAR. L'approche repose sur la segmentation du modèle numérique d'élévation de haute précision généré par le LiDAR en unités distinctes de paysages. Le logiciel LandMar© (MacMillan, 2000) a été mis à profit dans la mise au point technique et la validation de cette approche de reconnaissance de la variabilité des sols. Bien que l'efficacité du logiciel LandMapR© dans l'analyse des interrelations entre les propriétés des sols et du paysage ait été démontrée dans l'ouest canadien et ailleurs dans le monde, l'outil n'a pas été mis à l'essai sur le parcellaire québécois. Le projet capitalise ainsi sur les capacités éprouvées de segmentation de LandMapR et la disponibilité inédite de MNA de haute précision généré par le LiDAR afin de proposer une cartographie de zones hydropédologiques facilitant la gestion du sol et de l'eau à l'échelle de la ferme.

La mise au point technique de l'approche de segmentation du MNA-LiDAR et sa validation se sont déroulées en deux étapes. Dans un premier temps, la résolution spatiale du MNA la plus appropriée dans la délimitation des zones hydropédologiques a fait l'objet de vérifications. Compte tenu de la précision des observations générées par le LiDAR, plusieurs éléments du relief résultant de l'aménagement des terres sont révélés dans le MNA, tels que les fossés, les cours d'eau ou le profilage des planches. Ces propriétés « héritées » du relief ne reflètent pas les propriétés intrinsèques des sols et nuisent en fait à la reconnaissance du gradient naturel dans leurs propriétés. Une résolution spatiale optimale doit ainsi être retenue dans le traitement du MNA de façon à tirer profit de la précision du MNA-LiDAR tout en ciblant la reconnaissance des attributs naturels du paysage. Trois résolutions spatiales de MNA-LiDAR (5, 10 et 20 mètres) ont été ainsi évaluées dans la segmentation des zones hydropédologiques au moyen de LandMapR©. En second lieu, la stratification du MNA en zones hydropédologiques a été confrontée aux prospections pédologiques réalisées à diverses échelles, afin d'évaluer la finesse et l'exactitude des classifications réalisées avec LandMapR© pour le territoire étudié.

2.5.1 Acquisition et traitement des relevés pédologiques

Dans une perspective opérationnelle, il apparaissait essentiel de s'assurer que l'approche de reconnaissance de zones hydropédologiques mise à l'essai dans le cadre du projet GRISE soit validée sur la base d'observations terrain, préalablement à la recommandation de son application à d'autres régions agricoles. Retenons à priori qu'à l'échelle d'un champ, la gestion par zones définies de manière inappropriée peut s'avérer moins efficace qu'une gestion uniforme (Fridgen et coll., 2000). Un effort important a donc été consenti dans la prospection pédologique des sites à l'étude afin de valider la finesse et l'exactitude des classifications de zones de sol réalisées avec le logiciel de segmentation de MNA LandMapR© retenu pour les fins du projet. Les prospections pédologiques du territoire à l'étude ont été réalisées par deux agronomes pédologues, respectivement associés à Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et à l'IRDA, assistés d'un étudiant stagiaire de l'Université Laval. Ces prospections ont permis d'évaluer les capacités prédictives de LandMapR© selon trois échelles différentes.

À l'échelle du champ ou intra-parcellaire (1:7 500), des mesures quantitatives des propriétés des sols ont été privilégiées pour supporter l'analyse statistique comparative avec les prédictions de LandMapR©. La prospection pédologique détaillée de trois champs situés dans les bassins des ruisseaux Ewing et Walbridge a été réalisée à l'été 2007 en support au processus de validation des segmentations du MNA-LiDAR. L'échantillonnage a été réalisé de façon systématique, à tous les 50 mètres, selon deux transects par champ. Un total de 111 sites ont ainsi été échantillonnés afin de confronter la classification hydroédologique produite par LandMapR© avec la réalité terrain. Les échantillons de sol de surface ont été analysés en laboratoire afin d'en déterminer le pH, le pourcentage de matière organique, la teneur en limon (grossier, moyen, fin, total) en sable et en argile. Ces prospections ont été réalisées sur des champs dont les gradients pédologiques étaient particulièrement contrastés et profitaient d'une couverture complète de MNA et d'une classification en zones homogènes de régie des sols supportée par LandMapR©.

À l'échelle du bassin versant du ruisseau Walbridge (1:20 000; 6 km²), le processus de validation a tiré profit d'une couverture pédologique détaillée au 1:20 000 (1 observation par 4-8 ha) acquise par la pédologue et agronome Lucie Grenon en contribution à un projet local d'actions concertées en bassins versants (Michaud et coll., 2004). La prospection pédologique a été réalisée en 2004 et 180 profils pédologiques ont été décrits et géoréférencés selon la procédure standard proposée par Nolin et coll. (1994).

À l'échelle du bassin versant du ruisseau Ewing (1:40 000; 40 km²), la couverture pédologique semi-détaillée au 1:40 000 consiste en 176 observations (Figure 14) caractérisées selon la procédure standard proposée par Nolin et coll. (1994). Les données ont été acquises et localisées géographiquement à l'aide d'un GPS muni d'un PC de poche iPAQ contenant le logiciel ArcPAD. L'interface de saisie interactive, développée par AAC pour les GPS Trimble GeoExplorer (Sylvain et coll., 2006), a été adaptée à l'interface iPAQ-ArcPAD afin de faciliter l'acquisition des caractéristiques des profils avec l'équipement de l'IRDA.

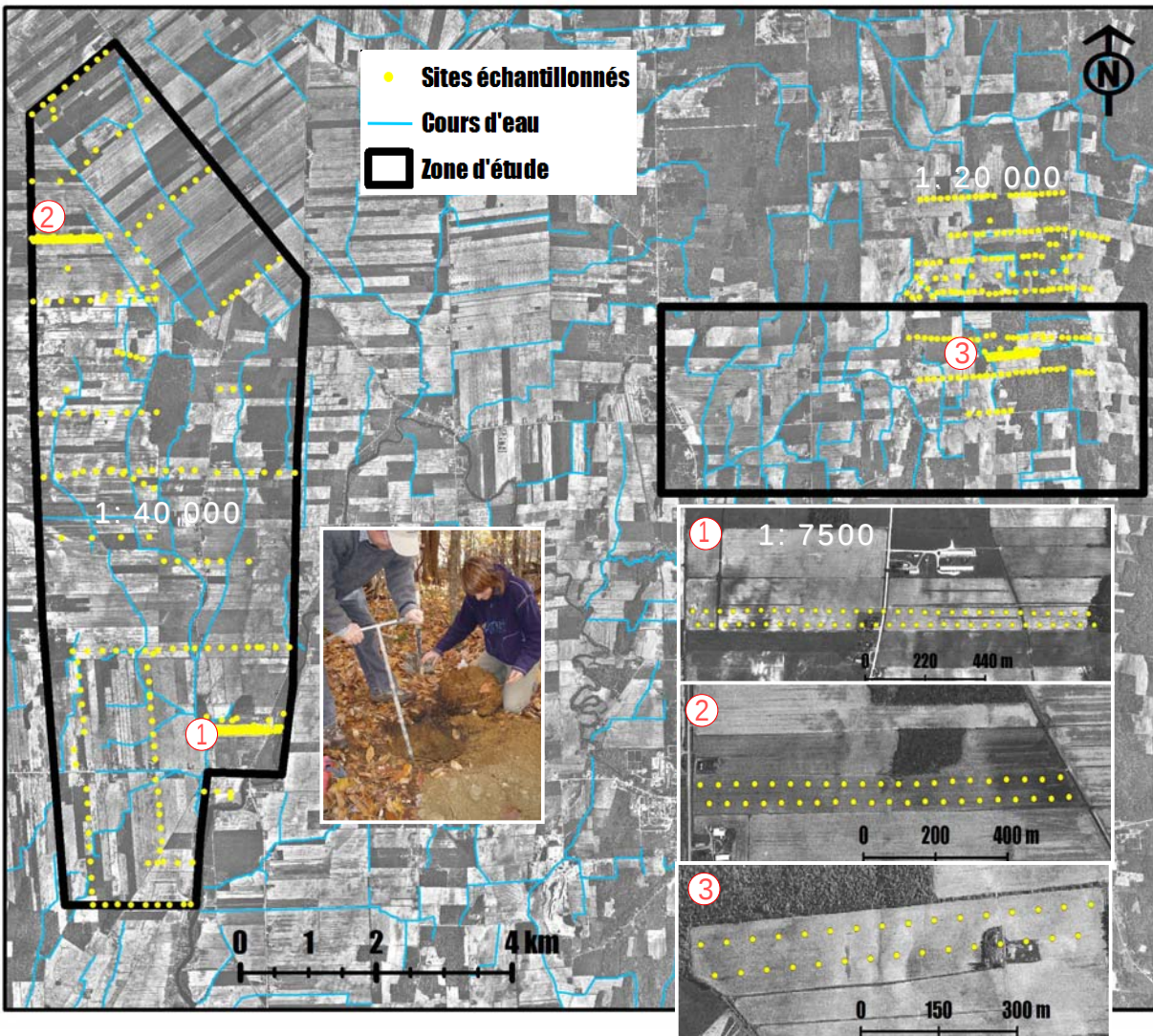


Figure 14 : Localisation des sites caractérisés par les prospections pédologiques au 1:20 000, 1:40 000 et 1:7 500 sur les bassins des ruisseaux Ewing et Walbridge.

2.5.2 Classification des attributs du paysage par LandMapR©

L'étude de l'influence de la résolution du MNA-LiDAR sur les stratifications du paysage proposées par LandMapR© visait d'abord à identifier la résolution la plus appropriée pour délimiter des zones hydropédologiques. Les classifications générées par LandMapR© ont ainsi été comparées selon trois résolutions distinctes de MNA en données, correspondant respectivement à des pixels de 5, 10 et 20 mètres. Globalement, la résolution du MNA s'est avérée déterminante tant sur le nombre de classes de relief générées que sur leur étendue (Figure 15). Le nombre de classes passe effectivement de 12 à 5, pour des résolutions respectives de 5 et 20 mètres, et présente des patrons spatiaux nettement distincts.

Effet de la résolution du MNA-LiDAR sur la génération des zones hydropédologiques

La classification du MNA de 5 mètres dérive le plus grand nombre de classes par champ. Puisque les structures anthropiques telles que les planches bombées et les fossés sont discernables à cette résolution (Figures 15a), LandMapR© tient compte de toutes ces micro-structures lors du calcul des positions relatives et absolues des pixels ainsi que des calculs de pente nécessaires à la classification des zones hydropédologiques. On remarque en effet que les classes des formes résultantes sont, pour la plupart, alignées parallèlement aux parcelles. Le centre des parcelles, soit la partie la plus élevée, est généralement classé comme col. Suivant un gradient transversal à la parcelle, les classes « Épaulements

divergents », « Revers de pente divergent » et « Bas de pente » se succèdent jusqu'au fossé. La classification issue du MNA à résolution de 5 mètres offre ainsi un découpage très détaillé, dont les classes sont si nombreuses qu'elles demeurent difficiles à interpréter et à valider. Par ailleurs, l'hétérogénéité spatiale des classes est si importante qu'elle compromet la faisabilité de la gestion localisée des parcelles, en raison notamment de la taille de la machinerie utilisée.

Avec le MNA de 10 mètres, les classes, moins nombreuses, ne s'alignent presque plus avec les parcelles (Figure 15b). Cette résolution traduit cependant le relief généré par les fossés les plus profonds et influence la génération de classes hydropédologiques de même que leur classification.

Les classifications du MNA de 20 mètres génèrent cinq à sept classes hydropédologiques selon les secteurs des bassins Ewing et Walbridge. À l'échelle de la parcelle, l'influence des fossés et des planches sur la segmentation du MNA n'est plus perceptible. Les classes proposées témoignent ainsi du patron spatial de la macro-topographie et reflètent, dans l'ensemble, l'aspect naturel du paysage (Figure 15c) tout en minimisant l'influence des aménagements anthropiques. Les polygones de la classification de LandMapR© générés avec le MNA à résolution de 20 mètres reflètent par ailleurs les relevés pédologiques colligés au 1:40 000 à l'échelle du site expérimental Ewing. La résolution de MNA de 20 mètres a ainsi été retenue dans l'exercice de validation statistique des capacités prédictives de LandMapR© à témoigner de zones de sol aux propriétés hydropédologiques contrastées.

Distribution spatiale des zones hydropédologiques

Suivant une résolution de MNA de 20 mètres, les deux territoires à l'étude, Ewing et Walbridge, présentent des patrons spatiaux distincts dans les zones hydropédologiques dérivées de LandMapR©. Bien que peu distants l'un de l'autre, rappelons que ces bassins chevauchent la zone de transition physiographique entre les Basses-Terres du Saint-Laurent et le piedmont appalachien. Dans le secteur d'étude du ruisseau Ewing, qui occupe une position relativement plus basse que le secteur Walbridge, la classe Terrasse de LandMapR© est dominante avec une occupation de 2 092 hectares, soit 50 % du bassin. En ordre décroissant de superficie, les classes Revers de pente (645 hectares; 15 %), Crête aplatie (590 hectares; 14 %), Bas de talus (459 hectares; 11 %) et Niveau le plus bas de la pente (420 hectares; 10 %) occupent respectivement le reste de la superficie du territoire à l'étude. Le secteur d'étude du ruisseau Walridge, plus représentatif du piedmont appalachien, témoigne d'une distribution spatiale de ses unités de paysages différente de celle associée au secteur Ewing. La classe Revers de pente y domine, avec 136 hectares pour 43 % du territoire caractérisé par le relevé LiDAR. La Terrasse et le Bas de talus occupent tous deux 18 % du territoire, suivi de la Crête aplatie (7 %), du Niveau le plus bas de la pente (7 %), de l'Épaulement divergent (5 %) et enfin, du Revers de pente divergent (2 %).

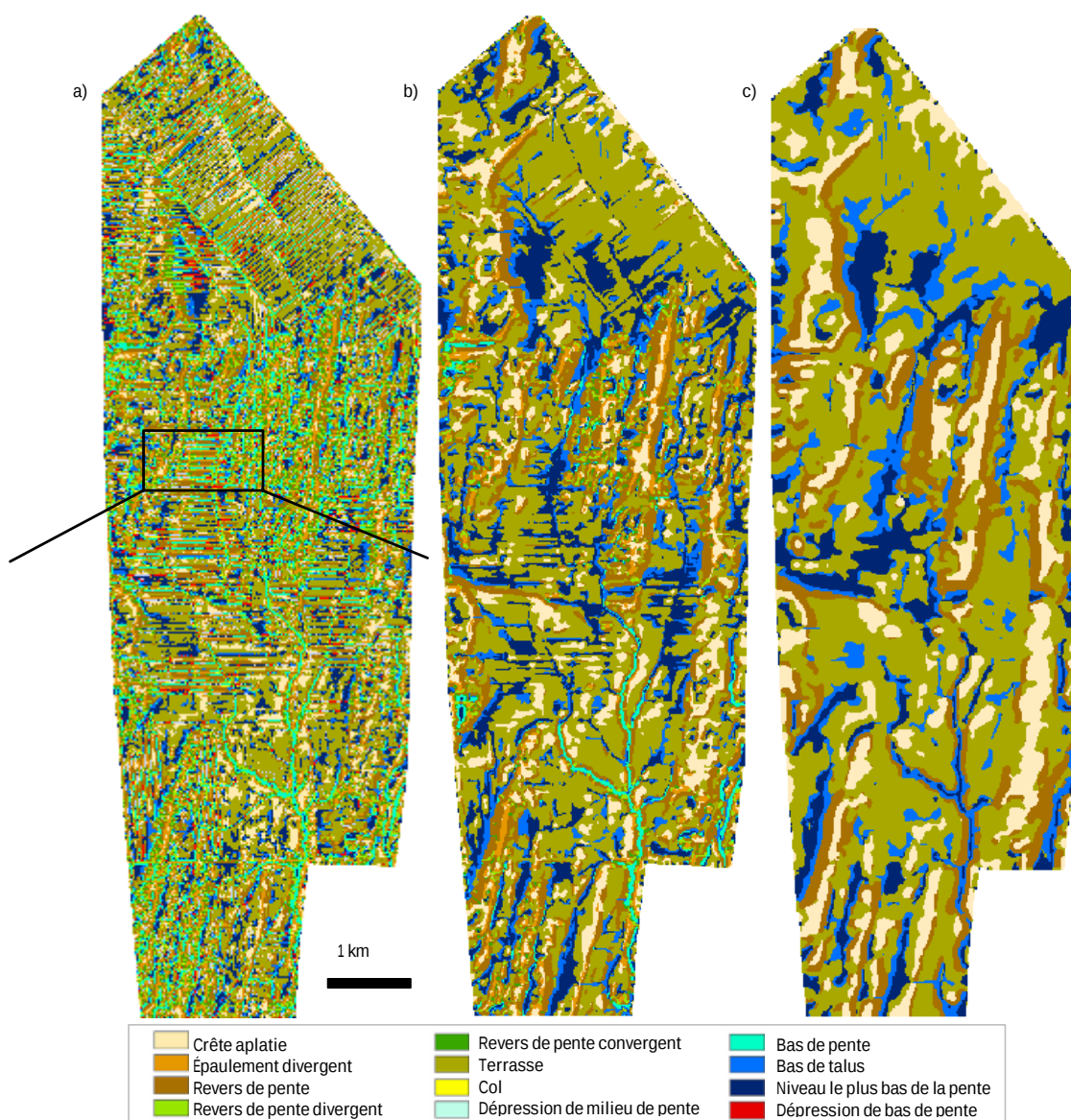


Figure 15 : Résultats de la stratification LandMapR© réalisée avec des résolutions de pixels du MNA LiDAR 5 m (a), 10 m (b) et 20 m (c).

En ce qui a trait aux champs supportant la validation de LandMapR© à l'échelle du 1:7 500, les sites associés aux Basses-Terres du Saint-Laurent (ruisseau Ewing) se sont vu attribuer cinq classes de zones hydro-pédologiques, soit la Crête aplatie, le Revers de pente, la Terrasse, le Bas de talus et le Niveau le plus bas dans le relief (Figure 16). Le troisième champ localisé dans le bassin du ruisseau Walbridge, représentatif du piedmont appalachien, s'est vu attribuer deux classes supplémentaires, soit le Revers de pente divergent et l'Épaulement divergent.

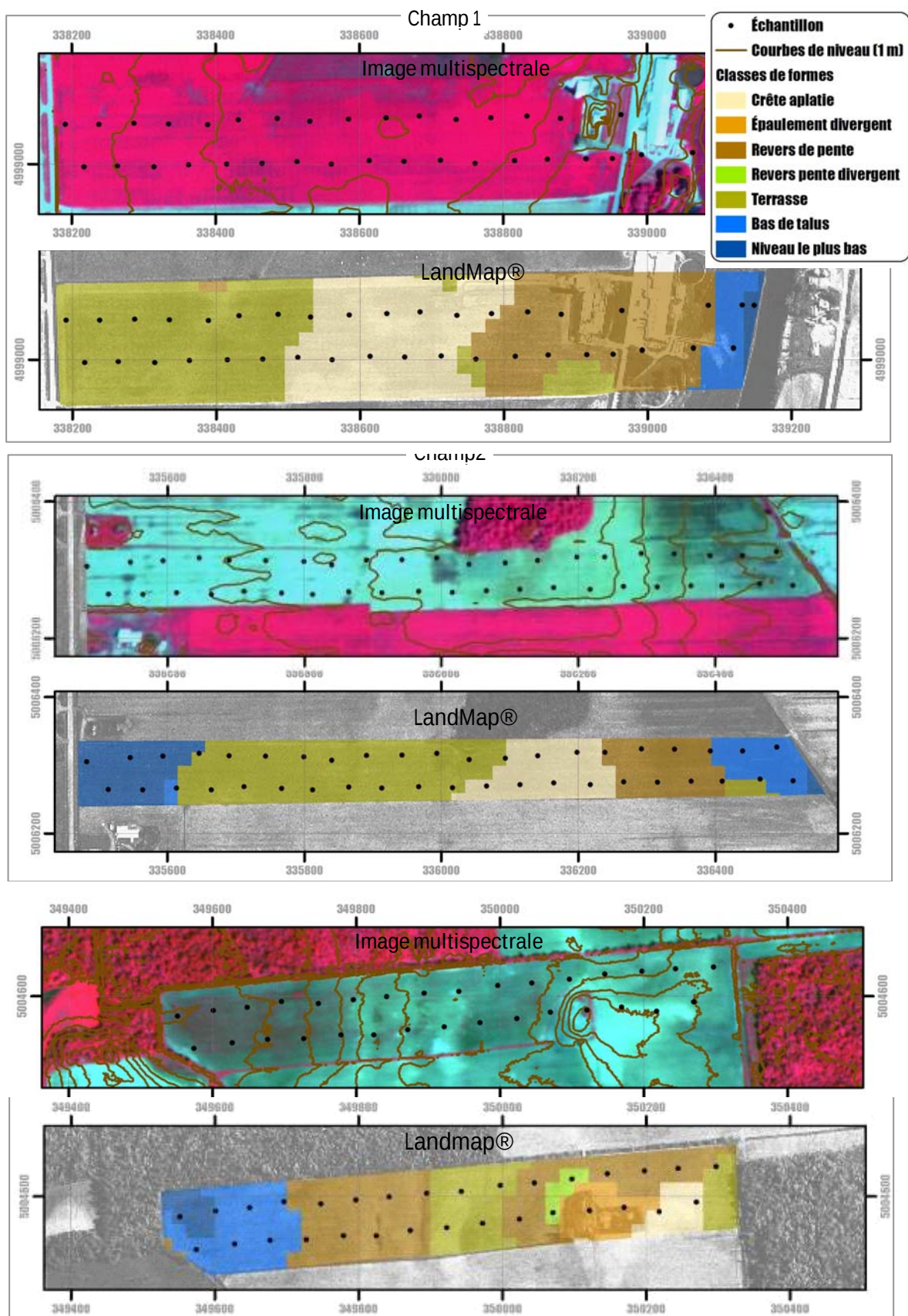


Figure 16 : Image multispectrale et courbes de niveau (LiDAR) confrontées aux résultats de la stratification LandMapR© réalisée avec une résolution de 20 mètres sur les 3 champs expérimentaux.

2.5.3 Validation de la segmentation du paysage en zones hydropédologiques

En raison des différents types de données pédologiques acquises sur le terrain, des approches distinctes ont été mises à profit dans la validation statistique des prédictions de LandMapR© selon les différentes échelles d'étude. À l'échelle intra-parcellaire (1:7 500), l'approche paramétrique retenue est adaptée aux mesures quantitatives des propriétés physico-chimiques du sol effectuées en laboratoire. Aux échelles du territoire (1:20 000 et 1:40 000), l'approche non-paramétrique est plutôt adaptée aux observations qualitatives, colligées sous la forme de classes de propriétés lors des prospections pédologiques. Quelque soit l'échelle ou la nature des données pédologiques, le but des analyses statistiques demeure cependant le même, soit d'évaluer dans quelle mesure les zones hydropédologiques délimitées par LandMapR© témoignent de la variabilité spatiale des propriétés du sol.

2.5.3.1 Validation statistique à l'échelle du champ (1:7 500)

Trois tests statistiques ont été mis à profit dans l'analyse des propriétés physico-chimiques des champs à l'étude, incluant le pH, la teneur en matière organique, la teneur en argile, la pente et l'élévation. Des statistiques descriptives de la variabilité de chacune des propriétés de sol ont d'abord été générées pour chacun des champs à l'étude. Celles-ci traduisent la variabilité globale des propriétés physico-chimiques du sol à l'échelle du champ, sans égard à la segmentation par zones.

Le recours à l'analyse multivariée en composantes principales (ACP) a par la suite permis de mettre en relief dans quelle mesure les zones hydropédologiques générées par LandMapR© se distinguent au plan de l'ensemble des propriétés physico-chimiques mesurées. Cette approche comporte l'avantage de considérer simultanément plusieurs variables explicatives dans la comparaison des différentes zones à l'étude. Une telle comparaison multivariée est généralement compliquée dans le cadre d'analyses classiques de variance, car les différentes propriétés physico-chimiques du sol présentent généralement de fortes corrélations. Aussi, l'ACP a permis de contourner ce problème en générant des composantes de variables, non corrélées entre elles, à partir d'un ensemble de propriétés physico-chimiques qui peuvent présenter, individuellement, des corrélations significatives entre elles. Les composantes principales, plutôt que les variables individuelles, sont alors mises à contribution dans l'explication de la variabilité inter-zones. La procédure PRINCOMP du logiciel SAS (2000) a été mise à profit dans l'ACP des observations des trois champs expérimentaux. Les composantes principales (CP) ont été évaluées à l'aide des valeurs et des vecteurs propres de la matrice de corrélation et seules les deux premières ont été retenues. Une analyse ACP indépendante a été produite pour chacun des trois champs échantillonnés.

En troisième lieu, une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée avec la procédure MIXED de SAS afin de détecter la présence de différences significatives entre les zones pour chacune des propriétés de sol à l'étude. Les mêmes variables que celles utilisées pour l'APC ont été retenues. La comparaison entre les zones a été réalisée avec le test de différences des moindres carrés (LSD). Cette approche est complémentaire à l'analyse en composantes principales, dans la mesure où elle traduit la pertinence de la segmentation du champ en zones pour chaque propriété physico-chimique du sol à l'étude. Un résultat significatif pour une propriété donnée implique que la variabilité interzonale est inférieure à celle de l'ensemble du champ. Sur le plan opérationnel, une variabilité interzonale significative justifierait l'échantillonnage du champ par zone et possiblement une gestion différenciée des amendements et fertilisants selon les résultats analytiques des propriétés du sol.

Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives des propriétés physico-chimiques des sols des trois champs échantillonnés au 1:7 500 sont décrites aux figures 16 et 17. Ces statistiques sont comptabilisées pour cinq paramètres quantitatifs qui ont été évalués en laboratoire soit le pourcentage d'argile, de sable, de limon, de matière organique et le pH, ainsi que pour deux paramètres dérivés de l'imagerie, soit l'élévation et la pente.

En ce qui a trait à la texture du sol, les projections de la classe texturale illustrées à la figure 16, de même que les boîtes à moustache de Tukey, illustrées à la figure 17, mettent en relief une variabilité spatiale beaucoup plus élevée pour les champs 1 et 2, localisés dans le bassin du ruisseau Ewing, que pour le champ 3. Les forts écarts interquantiles des teneurs en argile, en sable et en limon associées aux

champs 1 et 2 font en sorte que les classes texturales passent respectivement de l'argile lourde au sable loameux et de l'argile au loam sableux. Dans le champ 3, les pourcentages de sable varient entre 34 et 60 % et ceux de l'argile, entre 17 et 33 %, ce qui confère aux sols des classes variant de loam sableux à loam argileux.

Pour la matière organique, les sols du champ 3 ont des teneurs notablement plus élevées, avec une valeur médiane de 5,12 %. Quant aux champs 1 et 2, ils ont des médianes respectives de 3,64 et 3,18 %. Par ailleurs, ces derniers présentent des distributions moins étalées de leur taux de matière organique que le champ 3. Pour le pH des sols de surface, les médianes évaluées à l'échelle des trois champs varient entre 5,8 et 6,9. Le champ 2 présente l'écart interquartile le plus prononcé.

Quant aux paramètres topographiques, ceux-ci témoignent bien de la géographie des sites à l'étude, empreinte par la transition entre le piedmont appalachien et les Basses-Terres du Saint-Laurent. Le champ 3, situé à l'extrême Est, présente une élévation moyenne de 85,3 mètres, alors que les champs 2 et 3, plutôt représentatifs des Basses-Terres du Saint-Laurent, présentent des élévations moyennes respectives de 49,6 et 36,8 mètres. Les pentes moyennes tendent à augmenter de l'ouest vers l'est, passant de 0,95 % (champ 1) à 1,39 % (champ 3). Le champ 3 possède le plus grand écart interquartile, ce qui est cohérent avec son gradient altimétrique nettement plus élevé (79,8 à 90,3 mètres). Notons cependant que le champ 1 est associé à une distribution très dissymétrique de la pente, alors que le quart des observations y sont associées à des valeurs variant entre 1,38 et 5,42 %.

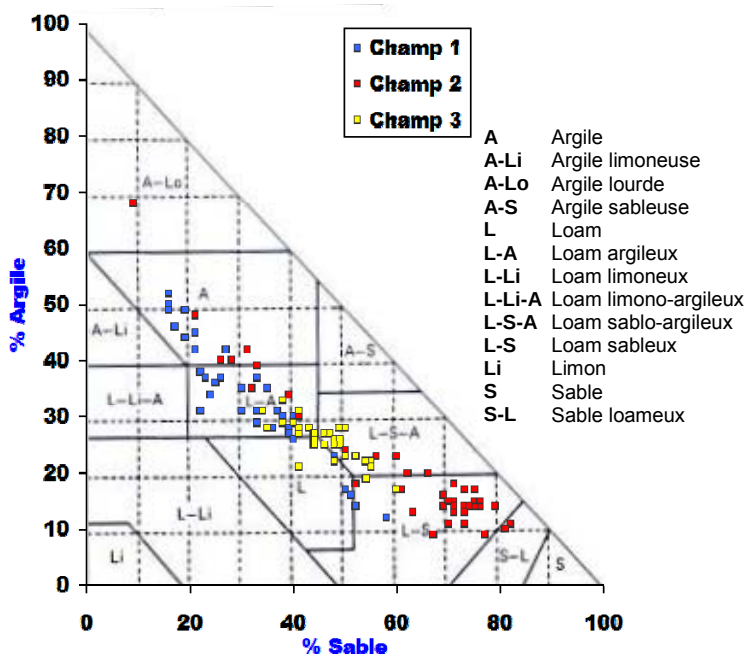


Figure 17 : Classes texturales des sols des 3 champs expérimentaux échantillonnés lors de la prospection pédologique à l'échelle 1:7 500.

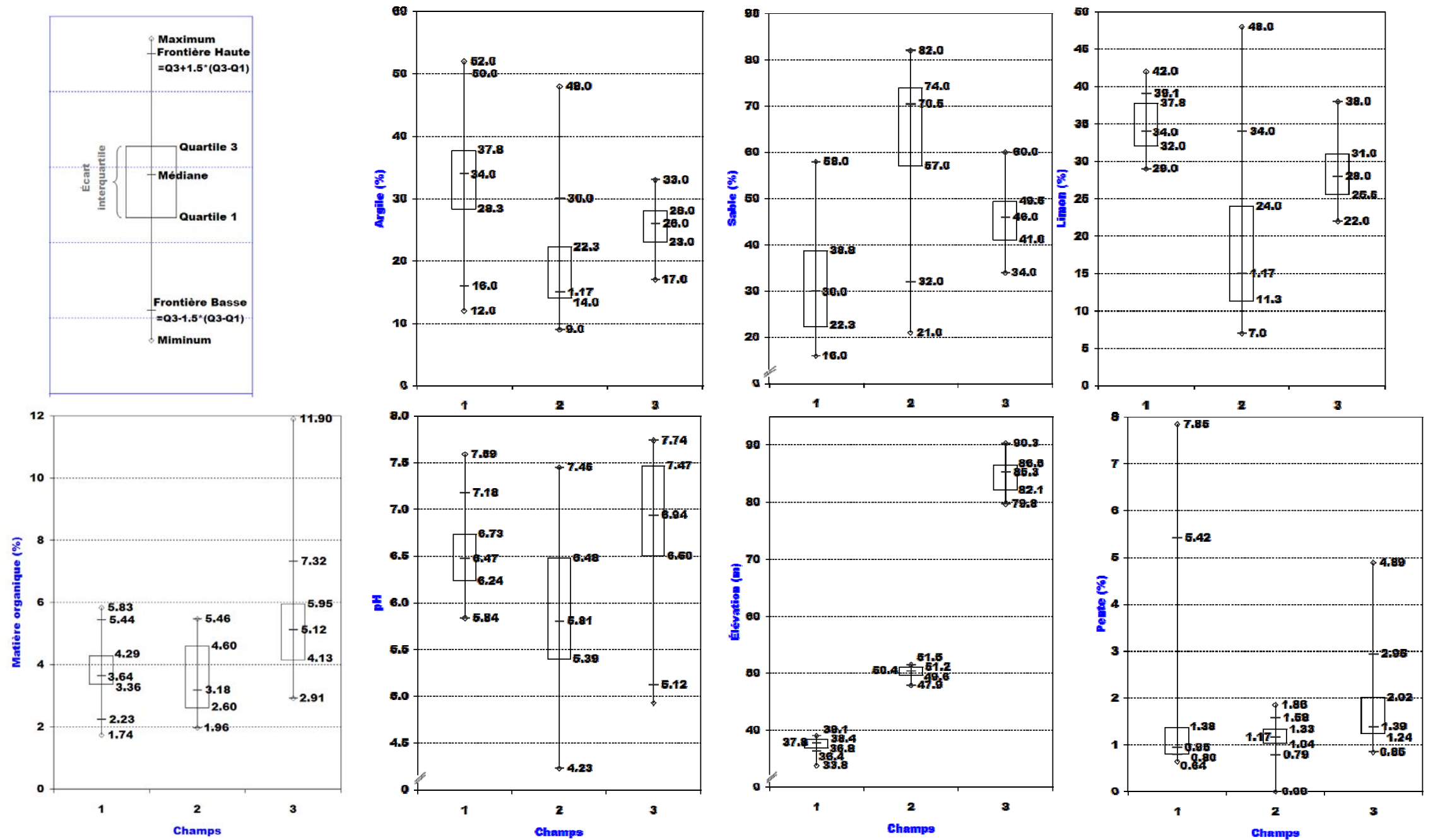


Figure 18 : Boite à moustache de TUKEY associée aux distributions des propriétés du sol des 3 champs échantillonnés au 1:7 500 incluant : a) le % d'argile, b) le % de sable; c) le % de limon, d) % de matière organique, e) pH, f) Élévation et h) % de pente.

L'analyse en composantes principales a été appliquée aux variables d'élévation, de pente, de teneur en matière organique, de teneur en argile et du pH. Le tableau 2 dénombre les échantillons prélevés pour chaque classe hydro pédologique dérivée par LandMapR© et ce, pour les trois champs.

Tableau 3 : Fréquence d'échantillonnage des classes de relief pour les trois champs expérimentaux.

Classes de forme	Champ 1	Champ 2	Champ 3
Crête aplatie	10	6	2
Revers de pente	11	8	14
Terrasse	14	18	4
Bas de talus	2	5	6
Niveau le plus bas de la pente	1	5	1
Épaulement divergent	0	0	2
Revers de pente divergent	0	0	2

Les résultats de l'ACP appliquée au champ 1 sont illustrés à la figure 19. Notons d'abord que la matrice des corrélations entre les variables explicatives met en relief des relations significatives entre les paramètres topographiques, le pourcentage d'argile et la teneur en matière organique. Aussi, le meilleur pouvoir explicatif de la variabilité interzone est exprimé en combinant les variables d'élévation et de pourcentage en argile (CP1). Ensemble, elles expriment 57 % de la variabilité entre les zones délimitées par LandMapR©, tel que révélé par les valeurs propres de la matrice de corrélation (Figure 19). En ajoutant la contribution du taux de matière organique et la pente en deuxième composante (CP2), l'explication de la variabilité interzonale atteint 76 %.

La matrice des vecteurs propres (Figure 19) nous renseigne pour sa part sur la contribution des propriétés individuelles à l'explication de la variabilité interzonale. Ainsi, le pouvoir explicatif de la CP 1 est associé à parts égales à l'élévation ($r = 0,48$) et au pourcentage d'argile ($r = 0,50$), alors que la CP 2 est fortement tributaire du pourcentage de matière organique ($r = 0,72$) et dans une moindre partie, de la pente ($r = 0,45$). La projection graphique des composantes principales en fonction des différentes classes hydro pédologiques générées par LandMapR© est illustrée à la figure 19. Cette représentation illustre en fait dans quelle mesure la combinaison des CP1 et CP2 parvient à distinguer les différentes zones hydro pédologiques, alors que les échantillons prélevés dans certaines zones tendent à se regrouper de part et d'autre des axes des composantes principales. La Crête aplatie, par exemple, est associée à des valeurs élevées de CP1 (élévation et taux de matière organique), de même qu'à de faibles valeurs de CP2 (pente et teneur en argile). Certains chevauchements sont néanmoins observables entre les regroupements des échantillons prélevés dans les différentes zones, principalement pour la zone de terrasses Il demeure par ailleurs difficile d'interpréter leurs distributions associées aux classes de Bas de talus et de Niveau le plus bas de la pente en fonction des axes CP 1 et CP 2 en raison du faible nombre d'observations.

Pour le champ 2, peu de corrélations significatives sont révélées entre les différents paramètres, exception faite du pourcentage de matière organique et de l'élévation ($r = 0,57$), de même qu'entre le pourcentage d'argile et le pH ($r = 0,56$). La première composante principale, corrélée principalement à l'élévation ($r = 0,48$) et au pH ($r = -0,55$), explique 45 % de la variance. L'ajout de la CP 2, permet d'atteindre 68 % d'explication avec l'inclusion du pourcentage d'argile ($r = 0,60$) et de la matière organique ($r = 0,59$). Les composantes CP1 et CP2 permettent de séparer distinctement les classes de Crête aplatie, Revers de pente et Niveau le plus bas de la pente. Les classes de Terrasse et du Bas de talus sont cependant moins bien discriminées (Figure 20).

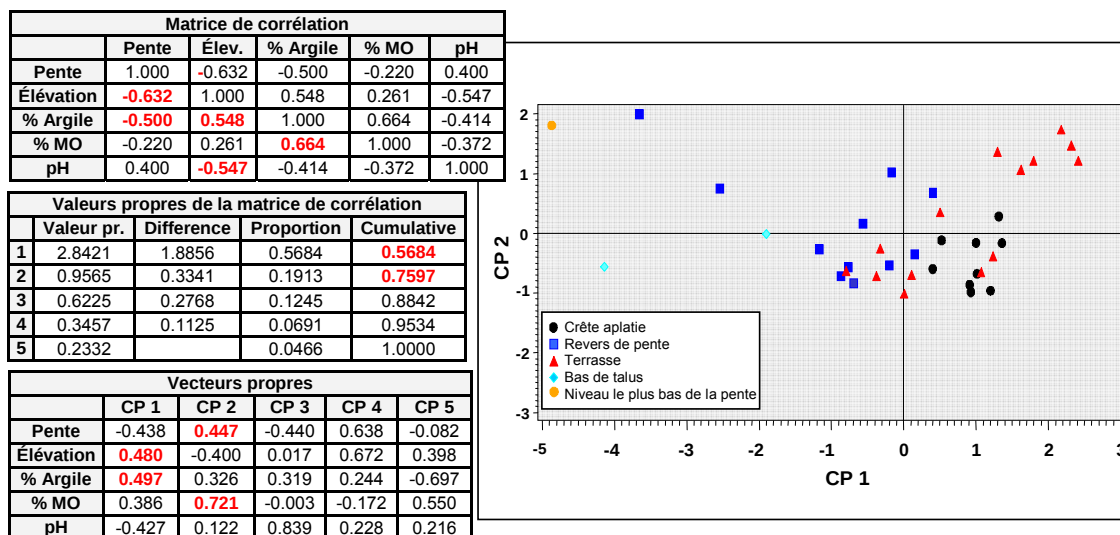


Figure 19 : Résultats de l'analyse en composantes principales des propriétés du sol en fonction des zones hydropédologiques pour le champ 1, incluant la matrice de corrélation, les valeurs propres de la matrice de corrélation ainsi que les vecteurs propres des composantes principales.

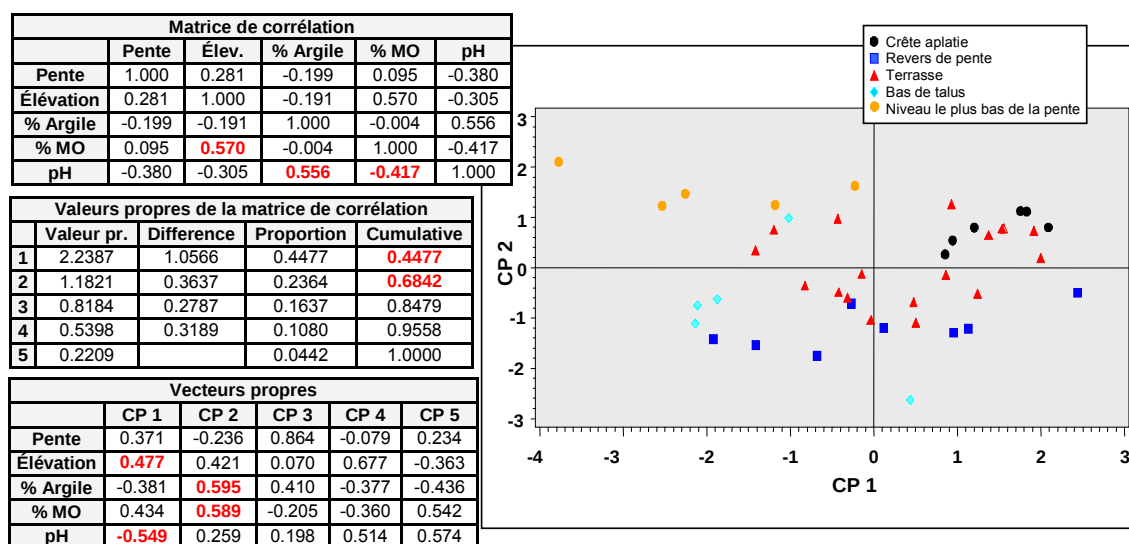


Figure 20 : Résultats de l'analyse en composantes principales des propriétés du sol en fonction des zones hydropédologiques pour le champ 2, incluant la matrice de corrélation, les valeurs propres de la matrice de corrélation ainsi que les vecteurs propres des composantes principales.

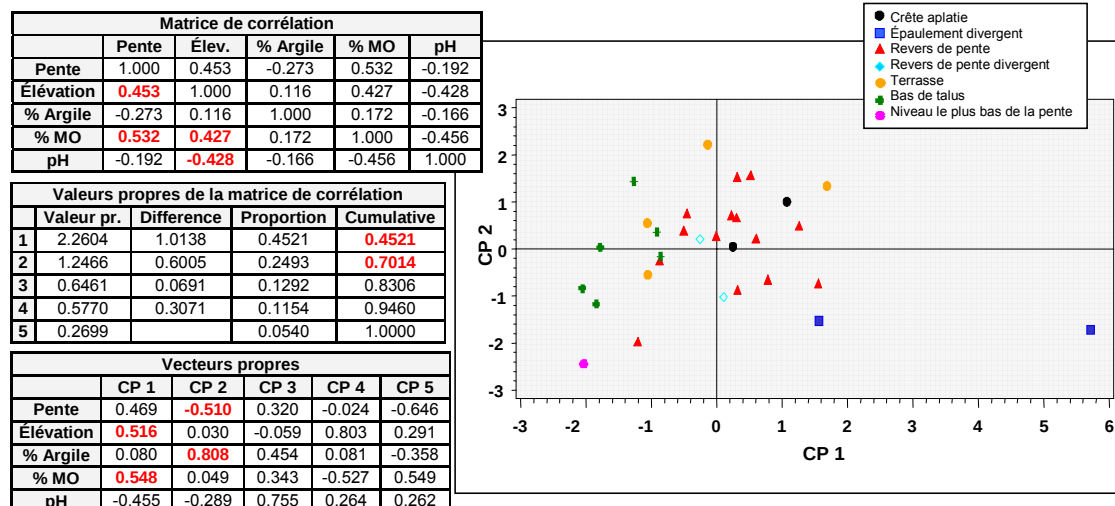


Figure 21 : Résultats de l'analyse en composantes principales des propriétés du sol en fonction des zones hydromorphologiques pour le champ 3, incluant la matrice de corrélation, les valeurs propres de la matrice de corrélation ainsi que les vecteurs propres des composantes principale.

Les résultats de l'ACP pour le champ 3 sont rapportés à la figure 21. Le pourcentage de matière organique y apparaît corrélé avec la pente ($r = 0,53$) et l'élévation ($r = 0,43$), alors que ces deux dernières sont corrélées entre elles ($r = 0,45$). La composante développée à partir de l'élévation et de la matière organique permet d'expliquer 45 % de la variance globale de l'appartenance des sites d'échantillonnage aux différentes classes hydromorphologiques. L'élévation et le taux de matière organique sont associés à des corrélations respectives de 0,52 et 0,55 avec la CP1. Les contributions du pourcentage d'argile et de la pente, corrélées respectivement au niveau de 0,81 et -0,51 avec la CP2, permettent d'atteindre 70 % d'explication de la variabilité globale des sites. Le faible échantillonnage des zones classées comme étant une Crête aplatie ($n = 2$), le Niveau le plus bas de la pente ($n = 1$), l'Épaulement divergent ($n = 2$) et le Revers de pente divergent ($n = 2$) rend cependant difficile l'interprétation de la distribution des composantes.

Analyse de variance

Le tableau 4 présente pour chacun des trois champs à l'étude une synthèse des résultats de l'analyse de variance (ANOVA) associée aux différentes zones générées par LandMapR® et appliquée au pourcentage d'argile, à l'élévation, au pourcentage de matière organique, à la pente et au pH. Les moyennes estimées pour chaque propriété de même que leurs intervalles de confiance au taux de 95 % sont pour leur part illustrés à la figure 22.

En ce qui a trait au champ 1, des différences significatives sont détectées entre les zones dérivées par LandmapR® pour les paramètres liés au pourcentage d'argile, à l'élévation, à la pente ($p < 0,0001$) et au pH. L'analyse du tableau des différences des moindres carrés (annexe B), démontre cependant que les zones Crête aplatie et Revers de pente ne sont pas significativement différenciées ($p = 0,28$) sur le plan du pourcentage d'argile (zones 1 et 2). Néanmoins, le pH permet de discriminer significativement ces 2 zones ($p = 0,0031$). Les pourcentages d'argile et de matière organique tendent par ailleurs à confondre les zones 4 ($p = 0,72$) et 5 ($p = 0,83$), associées au Bas de pente et au Niveau le plus bas de la pente. Néanmoins, le paramètre de pente différencie bien ($p < 0,0001$) ces deux zones.

Pour le champ 2, des différences significatives dans les propriétés du sol sont également relevées entre les différentes classes du relief proposées par LandMapR®, notamment le pourcentage d'argile et la pente ($p < 0,0001$), le pourcentage de matière organique ($p = 0,004$) ainsi que le pH ($p = 0,0191$). Des différences non significatives dans la teneur en argile sont notées entre la zone 1 et les zones 2, 3 et 4 ainsi qu'entre les zones 3 et 4 (annexe B). Le pourcentage de matière organique ($p < 0,02$) différencie cependant la zone 1 distinctement des autres classes de relief dérivées par LandMapR®, alors l'élévation distingue de façon significative ($p < 0,0001$) les zones 3 et 4.

En ce qui concerne le champ 3, les différences sont moins prononcées. Alors que les paramètres reliés au relief, soit l'élévation ($p < 0,0001$) et la pente ($p = 0,003$), se distinguent de façon significative entre les classes proposées par LandMapR®, ces dernières ne traduisent pas de différences significatives ($p > 0,05$) dans les propriétés physico-chimiques du sol. Retenons cependant que les teneurs en argile et en matière organique demeurent sensiblement différenciées ($p < 0,06$) entre les zones, alors que la distribution de l'interzonale pH demeure complètement aléatoire. La très forte variabilité du taux de matière organique et l'important gradient intra-parcellaire de l'élévation pour ce champ suggèrent que l'égouttement pourrait contribuer à la variabilité spatiale dans la réaction du sol.

Tableau 4 : Synthèse des tests de l'effet fixe associé aux zones hydropédologiques générées par LandMapR® pour les propriétés des sols des trois champs expérimentaux.

Champ 1, bassin du ruisseau Ewing				
	Num DF	Den DF	Fvalue	Pr>F
% argile	4	33	9,93	<0,0001
Élévation			18,71	<0,0001
% MO			1,99	0,1182
Pente			27,27	<0,0001
pH			4,13	0,008

Champ 2, bassin du ruisseau Ewing				
	Num DF	Den DF	Fvalue	Pr>F
% argile	4	37	23,95	<0,0001
Élévation			20,54	<0,0001
% MO			4,61	0,004
Pente			2,08	0,1027
pH			3,36	0,0191

Champ 3, bassin du ruisseau Walbridge				
	Num DF	Den DF	Fvalue	Pr>F
% argile	6	24	2,43	0,056
Élévation			19,07	<0,0001
% MO			2,39	0,0595
Pente			4,67	0,0028
pH			1,37	0,2663

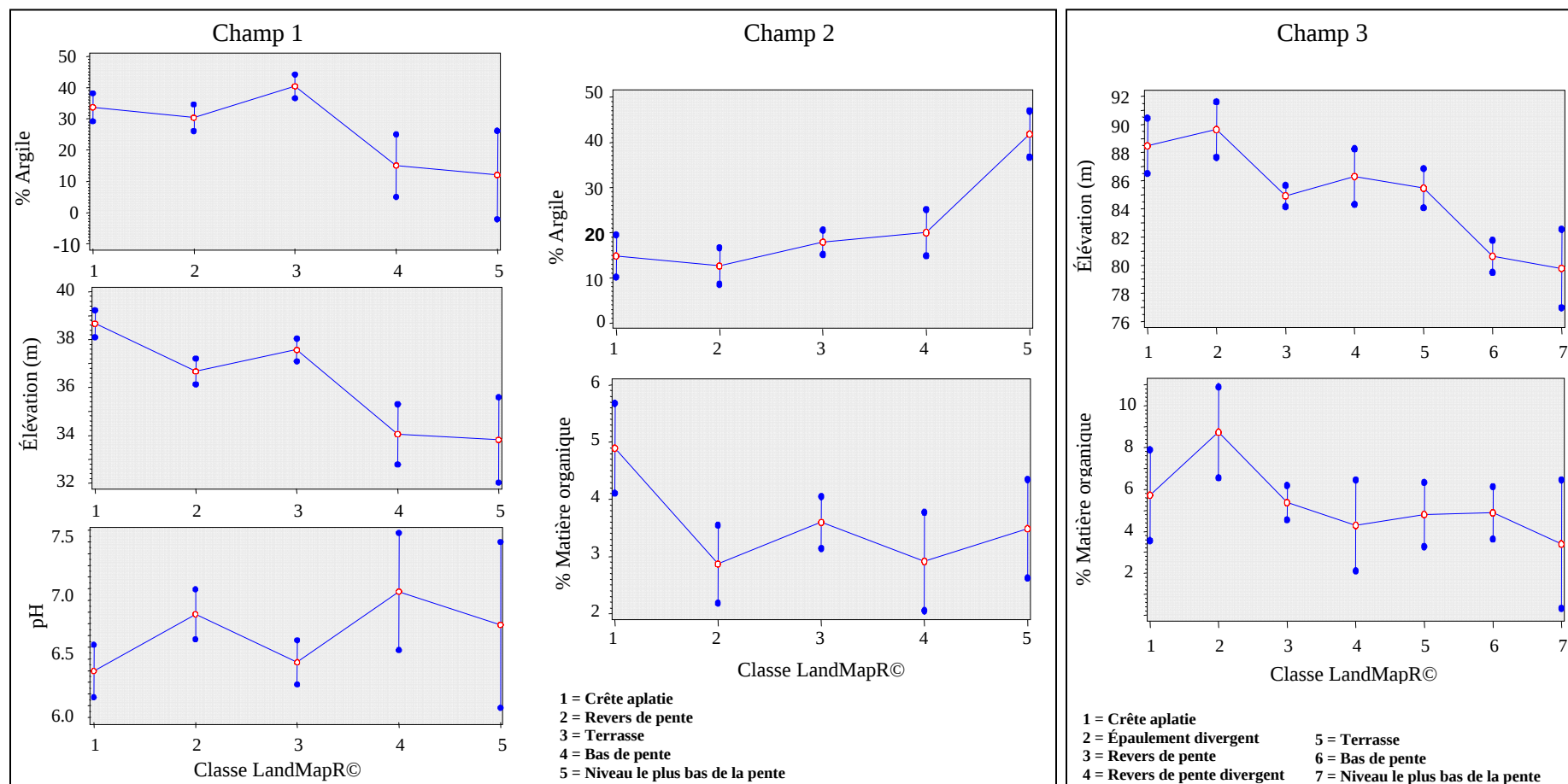


Figure 22 : Distribution des moyennes et bornes des intervalles de confiance à 95 % des variables pédologiques associées à chacune des zones hydropédologiques des trois champs expérimentaux.

2.5.3.2 Validation statistique de LandMapR® aux échelles territoriales (1:20 000 et 1:40 000)

L'approche retenue pour la validation des zones hydropédologiques générées par LandMapR® à l'échelle du territoire (1:40 000 et 1:20 000) s'apparente à celle appliquée à l'échelle parcellaire. Les observations colligées et géoréférencées sur le terrain par les pédologues sont mises en relation avec les mêmes classes hydropédologiques générées par la segmentation du MNA-LiDAR, lissé à une résolution de 20 mètres. Des approches statistiques non-paramétriques ont cependant été utilisées, puisque les observations pédologiques colligées lors des campagnes de prospection sont pour la plupart exprimées sous la forme de catégories ordonnées.

Dans un premier temps, la distribution des classes de chacune des variables a été étudiée en fonction de leur appartenance à l'une ou l'autre des zones hydropédologiques. Cet exercice a permis de sélectionner un ensemble de variables qui présentait le meilleur pouvoir discriminant des zones hydropédologiques. Des corrélations non paramétriques de Spearman ont ensuite été estimées entre les variables retenues et les classes dérivées de LandMapR®. Retenons que ces corrélations sont basées sur les rangs des observations et non sur leurs valeurs brutes. Elles représentent néanmoins la force du lien entre les variables descriptives des sols et les classes de LandMapR®. En troisième étape, une analyse de régression logistique a été appliquée aux classes de propriétés pédologiques (en variables explicatives) dans l'explication des classes de LandMapR®. Pour les fins de l'analyse statistique, les classes de LandMapR® ont été associées à des valeurs ordonnées comprises entre 1 et 7. Rappelons que ces variables ne sont pas continues et que leurs distributions ne suivent pas une loi normale, mais plutôt de type multinomiale ordinale. Les approches de régression linéaire ou d'analyse de variance traditionnelle ne sont donc pas appropriées pour ce type de variable réponse. Par contre, le modèle de régression logistique s'y prête bien. Les résultats de l'analyse de régression logistique expriment alors la probabilité cumulative qu'un site d'observation appartienne à une classe hydropédologique donnée ou inférieure.

$$F_{ij} = \sum_{m=1}^j p_{im}$$

où : F_{ij} est la probabilité cumulative que le site i soit dans la j^{e} catégorie ou une catégorie inférieure de LandMapR®, $j = 1, \dots, J$;

p_{ij} est la probabilité que le site d'observation i soit associé à la catégorie j de LandMapR®.

Le modèle de régression logistique s'exprime alors par l'ensemble de $J-1$ équations :

$$\log \left[\frac{F_{ij}}{1 - F_{ij}} \right] = \alpha_j + BX_i$$
$$BX_i = \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_k x_{ik}$$

où: β_i , x_i et α_i représentent respectivement les coefficients de régression, les variables explicatives et les ordonnées à l'origine de l'équation de régression linéaire.

La régression logistique identifie ainsi les variables qui démontrent le meilleur pouvoir explicatif de la probabilité qu'un site d'observation se retrouve dans une catégorie inférieure du LandMapR® plutôt que dans une catégorie supérieure (par exemple dans la catégorie 1, 2 ou 3 plutôt que dans la catégorie 4, 5, 6 ou 7). La procédure PROC LOGISTIC du logiciel SAS a été utilisée pour l'analyse de régression logistique suivant une sélection des variables par la méthode « stepwise ».

Distribution des descripteurs pédologiques

Chaque site d'observation a été caractérisé au moyen d'une vingtaine de descripteurs pédologiques selon une procédure standardisée (Nolin et al., 1994). Quatorze de ces descripteurs ont été retenus pour les analyses statistiques, soit : la classe de pente; le code de l'horizon A; la teinte, la luminosité et la saturation de l'horizon A; le sous-type, la classe et le grade de la structure de l'horizon A; la texture de l'horizon A et des matériaux parentaux; la profondeur de la nappe et du gley ainsi que la classe de drainage. Les fréquences de chacun des descripteurs pédologiques en fonction des sept classes de

LandMapR© pour les sites du bassin versant Ewing et Walbridge sont rapportées en annexe C. Ces distributions témoignent d'emblée de la prédominance de la classe hydropédologique Revers de pente dans le bassin vallonné du ruisseau Walbridge, de même que de la classe Terrasse qui domine le paysage du bassin du ruisseau Ewing. Notons aussi la concentration d'une proportion élevée des descripteurs pédologiques dans une ou deux catégories. Par exemple, 75 % des observations de Classes de pente du bassin du ruisseau Walbridge appartiennent à la classe de pente 2, où l'inclinaison du terrain varie entre 2 et 5 %. Dans le bassin Ewing, 82 % des observations appartiennent à cette même classe. En parallèle à cette problématique de distribution des variables explicatives et expliquées, quelques fréquences nulles (absence d'observation) associées à certains descripteurs pédologiques réduisent le pouvoir explicatif des analyses statistiques générées à partir des jeux de données.

L'étude de la distribution des données du site Walbridge témoigne que les sols échantillonnés sont majoritairement en culture avec des horizons anthropiques Ap. Quelques sites ont aussi été décrits dans des zones boisées. Ceux-ci présentent plutôt des horizons Ah dans lesquels des accumulations de matière organique sont observées. L'ensemble des horizons A des sites observés arborent une teinte orangée (10,0 YR), avec une luminosité et une saturation basse (30). Le tiers des sols à l'étude sont associés à un horizon A non structuré, alors que des grades de développement faibles à modérés caractérisent les autres sites d'observation. Les sous-types de structure varient de granulaire à massive avec une taille des agrégats majoritairement fine à moyenne. Près de la moitié des sols présentent un horizon A ayant une texture franche (loam) alors que les matériaux parentaux (horizon C) sont associés à des textures variant de loam à sableuse fine/sableuse grossière. La profondeur du gley se retrouve dans la majorité des sols à moins de 44 centimètres de la surface. La moitié des sols de ce bassin sont mal drainés alors que les autres varient entre bien et imparfaitement drainés.

Les sols caractérisés dans le bassin du ruisseau Ewing sont majoritairement des sols agricoles avec des horizons anthropiques Ap, dont la teinte se situe également dans les gammes orangées (10,0 YR), avec des luminosités basses et des saturations oscillant entre 20 et 30. Le tiers des sols échantillonnés sont caractérisés par un horizon A sans structure et sont de type massif, les autres étant associés à un développement de structure (grade) faible à modérée, majoritairement de forme polyédrique subangulaire avec des agrégats de taille fine à moyenne. Les textures de l'horizon A les plus fréquemment rencontrées sont le loam (30 %), le loam limoneux (16 %), le loam argileux (12 %), le loam sableux fin (12 %) et le loam limoneux argileux (12 %). La profondeur du gley se retrouve dans 40 % des cas entre 25 et 34 centimètres, soit sous l'horizon Ap. Typiquement, les sols de ce bassin sont mal drainés (73 %).

Corrélations non paramétriques de Spearman

Le tableau 5 rapporte les résultats des analyses de corrélation non paramétriques appliquées aux descripteurs pédologiques et aux classes hydropédologiques générées par LandMapR© pour chacun des sites Ewing et Walbridge. Rappelons que ces corrélations sont estimées sur les rangs des observations et non leurs valeurs brutes. Elles témoignent néanmoins de la force du lien entre les variables descriptives des sols et les classes hydropédologiques générées par la segmentation du MNA-LiDAR. Aussi, seules les variables quantitatives sont considérées, ce qui exclut notamment les variables Type de pente (TYPP) et Code de l'horizon A (ACOD). Les variables pour lesquelles les observations se concentrent dans une seule classe, de même que celles qui ne comportent pas suffisamment d'observations ont été exclues de l'analyse statistique.

Parmi les 13 variables retenues, la classe de drainage est le paramètre qui démontre les corrélations les plus élevées avec les classes de LandMapR©, tant pour le secteur Walbridge qu'Ewing (respectivement $r = 0,36$, $p < 0,001$; et $r = 0,25$, $p < 0,0001$). Cette corrélation suggère que les classes hydropédologiques occupant les positions les plus basses dans le relief des bassins versants (numéro de classe élevé de LandMapR©) sont associées à un mauvais drainage. Cette association témoigne du lien bien documenté entre la position occupée dans le paysage et l'égouttement du parcellaire. Une corrélation négative et significative est également mise en relief entre la saturation de la couleur caractérisant l'horizon A et les classes de LandMapR© (respectivement $r = -0,39$, $p = 0,0016$; et $r = -0,28$, $p = 0,0001$ pour les bassins des ruisseaux Walbridge et Ewing). Rappelons que la saturation de la couleur du sol, telle que définie dans le code de couleurs de Munsell, correspond à la vivacité ou à la pureté d'une couleur. Par opposition, la désaturation exprime le mélange de la couleur avec un gris de même valeur. Les corrélations nous indiquent donc que plus les classes de LandMapR© sont élevées

(associées à des zones basses du paysage), plus la couleur de l'horizon A tend à être désaturée. Cette relation témoigne vraisemblablement de gradients dans le taux de matière organique. Cette observation a d'ailleurs été soulevée dans la littérature par Schulze et coll. (1993) pour les horizons Ap à l'état humide. Des gradients spatiaux cohérents dans l'égouttement et la matière organique reflèteraient la dynamique d'accumulation de la matière organique dans les portions les moins bien drainées du parcellaire.

Bien que les deux sites d'étude démontrent des tendances similaires dans les corrélations entre les classes de relief, le drainage et la couleur du sol, ils se distinguent sur d'autres plans. L'épaisseur de l'horizon A est en effet significativement corrélée à la classe de LandMapR© ($r = 0,38$, $p = 0,002$) pour le site Walbridge, indiquant que les horizons A tendent à être plus développés en bas de versant (numéro de classe élevé de LandMapR©). Cette association n'est pas observée pour le site Ewing, qui se distingue plutôt par une corrélation négative ($r = -0,24$, $p = 0,001$) entre la classe de LandMapR© et la classe de pente. Les numéros élevés des zones LandMapR©, localisées en position basse du relief, sont ainsi associés à des pentes plus faibles.

Tableau 5 : Coefficients corrélation de Spearman entre les descripteurs pédologiques et les classes de LandMapR© pour les deux bassins versants à l'étude.

	Coefficients de corrélation de Spearman Prob > r under H0: Rho = 0 Nombre d'observations	
	Bassin du ruis. Walbridge	Bassin du ruis. Ewing
Classe de pente (PENT)	-0,2010 0,1083 65	-0,2366 0,0011 187
Teinte de l'horizon A (ATEI)		0,0538 0,4671 185
Luminosité de l'horizon A (AVAL)	-0,15465 0,2224 64	-0,13619 0,0645 185
Saturation de l'horizon A (ACHR)	-0,38697 0,0016 64	-0,27549 0,0001 185
Code de structure (ASTR1)	0,05924 0,6419 64	-0,01919 0,7949 186
Code de structure (ASTR2)	0,02802 0,826 64	0,04981 0,4996 186
Code de structure (ASTR3)	0,0565 0,6575 64	0,0427 0,5628 186
Texture horizon A (ATEX)	0,14595 0,2498 64	0,07574 0,3068 184
Épaisseur du A (EPAA)	0,37687 0,002 65	0,12889 0,0838 181
Profondeur de gley (PGLE)	-0,2723 0,0404 57	-0,18766 0,0134 173
Classe de drainage (DRAI)	0,36774 0,0028 64	0,25244 0,0006 181
Texture 1 du matériau 1 (M1T1)	0,18164 0,1476 65	0,10614 0,1482 187
Texture 2 du matériau 1 (M2T1)	-0,07606 0,5996 50	-0,01159 0,8749 187

Pour les fins des analyses de régression logistique appliquées séparément aux jeux de données des sites Walbridge et Ewing, toutes les variables ont été considérées à titre catégorique. Pour le bassin du ruisseau Walbridge, l'analyse de régression logistique a été appliquée aux variables explicatives de la classe de pente (PENT), la luminosité de l'horizon A (AVAL), la saturation de l'horizon A (ACHR), les codes de structure de l'horizon A (ASTR1, 2 et 3), la texture de l'horizon A (ATEX), la classe de drainage du sol (DRAI) et la texture du matériau 1 (M1T1). Les autres variables ont été exclues de l'analyse en raison d'un nombre élevé de données manquantes. La classe 2 générée par LandMapR© (Épaulement divergent) et la classe 7 (Niveau le plus bas de la pente), toutes deux associées qu'à une seule observation, ont été écartées de l'analyse pour satisfaire le nombre minimal requis d'observations par classe de la variable réponse. Dans le cas du bassin du ruisseau Ewing, trois variables additionnelles ont été considérées, soit le type de pente (TYPP), la teinte de l'horizon A (ATEI) et la texture 2 du matériau 1 (M1T2).

Les tableaux 6 et 7 rapportent les résultats des analyses de régression logistique appliquées respectivement aux données des bassins Walbridge et Ewing. Dans les deux cas, seule la classe de drainage (variable DRAI) a été retenue dans le modèle final au terme de l'analyse statistique, faisant intervenir une à une les différentes variables explicatives (méthode « stepwise »). La contribution significative de la classe de drainage dans le modèle de régression logistique reflète essentiellement la corrélation non paramétrique établie avec les mêmes variables. Rappelons que l'intérêt de l'analyse de régression logistique reposait ici sur la possibilité faire intervenir plusieurs variables (approche multivariée) dans l'explication de la variabilité entre les zones hydropédologiques. L'approche non paramétrique n'aura cependant permis de différencier ces zones que sur la seule base de la classe de drainage observée sur le terrain.

Les ratios de vraisemblance rapportés aux tableaux 6 et 7 décrivent plus en détail la probabilité d'appartenance des zones hydropédologiques aux différentes classes de drainage. Pour le bassin du ruisseau Walbridge par exemple (Tableau 6), le ratio de 6,2, associé à la comparaison d'un bon drainage (DRAI = 3) à un mauvais drainage (DRAI = 6), exprime que la probabilité qu'un site d'observation soit classé par LandMapR© dans une classe inférieure (correspondant à des sols localisés en position haute dans le relief) est six fois plus élevée lorsque la classe de drainage du sol est bien drainée (DRAI = 3) que lorsque celle-ci est mal drainée (DRAI = 6). De la même façon, la probabilité que le sol soit classé par LandMapR© dans une catégorie inférieure (position haute dans le relief) est 13 fois plus élevée lorsqu'un sol est imparfaitement drainé (DRAI = 5) que lorsque celui-ci est mal drainé (DRAI = 6).

Pour le bassin du ruisseau Ewing, les ratios de vraisemblance issus de la régression logistique expriment la même tendance (Tableau 7). La probabilité qu'un sol soit classé par LandMapR© dans une classe inférieure (position haute du relief) est ainsi 57 fois plus élevée lorsque le sol est bien drainé (DRAI = 3) que lorsque celui-ci est très mal drainé (DRAI = 7). De la même façon, la probabilité qu'un sol soit classé par LandMapR© dans une catégorie inférieure pour les sols modérément drainés (DRAI = 4), imparfaitement drainés (DRAI = 5) et mal drainés (DRAI = 6) est respectivement 8 fois, 4,5 fois et 1,5 fois plus élevée que pour les sols très mal drainés (DRAI = 7).

Les résultats de corrélation et de régression non paramétrique appliquée aux observations pédologiques des deux bassins expérimentaux confirment tous deux la relation étroite entre la position occupée par la zone hydropédologique générée par LandMapR© et la qualité du drainage observée sur le terrain. Plus un site d'observation est situé en position basse dans le relief (correspondant à des classes de LandMapR© élevées), plus la probabilité d'y observer un mauvais drainage (DRAI supérieur) est élevée. En pratique, la relation entre la position occupée dans le paysage et la proximité de la nappe d'eau est bien connue des producteurs et des conseillers agricoles et sa validation ne requiert pas d'outils statistiques sophistiqués. L'intérêt des résultats des analyses statistiques tient plutôt à la validation qu'ils apportent à l'approche de segmentation du relief mise à l'essai dans le cadre de la présente étude. Dans une perspective de transfert de la méthode à d'autres régions agricoles, il est essentiel de définir une approche de segmentation du paysage appliquée au Québec qui puisse traduire les gradients spatiaux dans le drainage du sol. D'une part, il est généralement établi que l'égouttement de la parcelle demeure le principal facteur limitant de la productivité des cultures au Québec. Par ailleurs, des différences dans l'égouttement conditionnent généralement le développement de propriétés contrastantes du sol.

L'altération de la condition physique du sol peut découler de passages ou de travaux aratoires en conditions d'humidité défavorables. Au plan de la fertilité, l'accumulation de matière organique et de nutriments, de même que l'acidité du sol peuvent découler de conditions d'humidité plus prononcées. Le fait que l'approche de segmentation mise à l'essai témoigne du patron spatial dans les classes de drainage des sols augure donc très bien pour son application à d'autres régions agricoles.

a) Analyse des effets du Type 3						
Effet	DF	Chi-carré de Wald		Pr > Chi ²		
DRAI	3	12,8458		0,0050		

b) Analyse des estimateurs du maximum de vraisemblance						
Paramètres		DF	Estimateur	Erreur standard	Chi-Square de Wald	Pr > Chi ²
Intercepte	1	1	-2,0187	0,4713	18,3438	<,0001
Intercepte	3	1	1,0661	0,3860	7,6291	0,0057
Intercepte	4	1	1,8515	0,4299	18,5475	<,0001
Intercepte	5	1	3,0821	0,5616	30,1147	<,0001
DRAI	3	1	0,5479	0,7234	0,5737	0,4488
DRAI	4	1	-0,5932	0,5645	1,1041	0,2934
DRAI	5	1	1,3165	0,5276	6,2257	0,0126

c) Ratios de vraisemblance (« Odds Ratio »)			
Effets	Estimateur	Limites de confiance de Wald à 95%	
DRAI 3 vs 6	6,166	0,847	44,896
DRAI 4 vs 6	1,970	0,478	8,124
DRAI 5 vs 6	13,299	3,134	56,444

Tableau 6: Résultats du modèle de régression logistique appliqué aux données du bassin du ruisseau Walbridge incluant le chi-carré (a), les estimateurs du maximum de vraisemblance (b) et les estimateurs « odds Ratio » (c) pour le paramètre classe de drainage (DRAI).

2.5.4 Synthèse et implications opérationnelles

Dans l'ensemble, les résultats des analyses en composantes principales et de variance des propriétés physico-chimiques du sol et du relief sont cohérents. Ils témoignent globalement de l'efficacité de l'approche de segmentation appliquée au MNA-LiDAR d'une résolution de 20 m à produire des zones hydropédologiques qui se distinguent de façon significative au plan de leurs propriétés. Dans une perspective opérationnelle, l'approche de segmentation développée et validée dans le cadre du projet GRISE présente ainsi un fort potentiel d'application en gestion localisée du parcellaire agricole. Une des implications pratiques de ce volet de l'étude est la pertinence de considérer un ensemble de propriétés du parcellaire dans la segmentation du relief en zones de gestion distinctes. En effet, l'analyse de variance ne témoigne pas toujours de différences significatives entre les zones hydropédologiques pour une propriété physico-chimique du sol donnée. D'autres propriétés peuvent cependant prendre le relais et témoigner de différences significatives entre les mêmes zones. Les résultats de l'analyse en composantes principales témoignent de la nature multivariée de la variabilité des propriétés du parcellaire. La mise à contribution de plusieurs variables explicatives a ainsi permis d'expliquer entre 68 et 76 % de la variabilité entre les zones hydropédologiques des sites à l'étude.

a)

Analyse des effets Type 3			
Effet	DF	Chi-Square de Wald	Pr > Chi ²
DRAI	4	15,5903	0,0036

b)

Analyse des estimateurs du maximum de vraisemblance						
Paramètres		DF	Estimateur	Erreur standard	Chi-carré de Wald	Pr > Chi ²
Intercepte	1	1	-1,5884	0,4607	11,8867	0,0006
Intercepte	2	1	-0,2394	0,4301	0,3098	0,5778
Intercepte	3	1	2,1895	0,4514	23,5282	<,0001
Intercepte	4	1	3,1472	0,4874	41,6934	<,0001
DRAI	3	1	2,4358	1,0613	5,2675	0,0217
DRAI	4	1	0,4424	0,8215	0,2900	0,5902
DRAI	5	1	-0,0795	0,5096	0,0244	0,8760
DRAI	6	1	-1,1964	0,4457	7,2045	0,0073

c)

Ratios de vraisemblance (« Odds Ratio »)			
Effets	Estimateur	Limites de confiance de Wald à 95 %	
DRAI 3 vs 7	56,718	1,553	> 999,999
DRAI 4 vs 7	7,727	0,326	183,397
DRAI 5 vs 7	4,585	0,305	68,826
DRAI 6 vs 7	1,501	0,110	20,513

Tableau 7: Résultats du modèle de régression logistique appliqué aux données du bassin du ruisseau Ewing incluant le chi-carré (a), les estimateurs du maximum de vraisemblance (b) et les estimateurs « odds Ratio » (c) pour le paramètre classe de drainage (DRAI).

La distinction des zones hydropédologiques au moyen des observations qualitatives acquises par la prospection pédologique à l'échelle du territoire est moins éloquente qu'à l'échelle du parcellaire. Le type d'analyse statistique non-paramétrique, dicté par la nature des données (classes ordonnées), explique en partie la différence dans les résultats obtenus entre les deux échelles de validation. Le nombre élevé de fréquences nulles et la concentration des observations dans un nombre restreint de classes ont aussi contribué à réduire le pouvoir discriminant de l'approche non-paramétrique dans la validation statistique des zones hydropédologiques dérivées de LandMapR© à l'échelle du territoire. Une implication pratique d'un meilleur pouvoir discriminant des descripteurs paramétriques des propriétés du sol est de privilégier la collecte de mesures quantitatives des propriétés du sol dans le processus de validation des zones hydropédologiques dérivées de la segmentation du MNA.

Dans l'ensemble, retenons que les résultats de la régression logistique appliquée aux descriptions qualitatives des sols à l'échelle du territoire demeurent cohérents avec les résultats de l'analyse de variance à l'échelle du parcellaire. Ils mettent en relief le pouvoir explicatif du paysage à traduire les propriétés des sols, et que l'égouttement demeure un élément déterminant de cette variabilité. Dans la perspective d'un support à la gestion localisée du parcellaire, ils témoignent aussi de l'applicabilité de l'approche de segmentation du MNA mise à l'essai dans le cadre de l'étude aux paysages de la région du piedmont appalachien. La validation de cette approche dans d'autres régions demeure certes une importante priorité de recherche.

Bien que présentant des différences significatives, retenons aussi que les zones délimitées par la segmentation du MNA-LiDAR présentent un important chevauchement au plan de leurs propriétés du sol. La Dans une perspective opérationnelle, un tel recoupement milite pour une validation des zones de gestion générées par la segmentation du paysage au moyen d'un échantillonnage localisé par zone de

sol. La segmentation du MNA constitue ainsi une première étape dans la reconnaissance de zones hydropédologiques présentant des propriétés distinctes. Dans une perspective de gestion localisée du parcellaire, une deuxième étape doit faire intervenir l'échantillonnage spatial des zones proposées par la segmentation hydropédologique de façon à valider : 1) que la différence dans les propriétés d'intérêt est significative et; 2) que ces différences sont assez importantes pour justifier une gestion localisée du parcellaire. L'approche de segmentation du paysage demeure ainsi un outil de gestion de la variabilité spatiale des propriétés du sol, complémentaire et avantageusement utilisé en amont de la démarche d'échantillonnage de la parcelle.

2.3 Analyse des résultats obtenus pour l'ensemble du projet

L'outil de gestion raisonnée et intégrée des sols et de l'eau (GRISE) développé dans le cadre du projet et offert aux entreprises et aux conseillers agricoles de la région à l'étude a mis à profit un ensemble de technologies innovantes en matière d'acquisition et de traitement de données à référence spatiale. La génération de modèles numériques d'altitude (MNA) par la technologie LiDAR démontre notamment un fort potentiel d'application en régie du parcellaire en culture. Couplées aux images aériennes numériques, les informations dérivées du modèle numérique d'élévation documentent de façon précise et cohérente les patrons spatiaux dans l'égouttement et le ruissellement des terres. Cette caractérisation spatiale de l'hydro-activité du parcellaire constitue un outil de première ligne dans le diagnostic, la planification et la mise en œuvre de chantiers d'aménagements hydro-agricoles, permettant d'apporter des solutions sur mesure, et à long terme, aux zones mal égouttées et improductives du parcellaire. Compte tenu des contributions importantes des zones mal égouttées à la contamination diffuse des eaux de surface, l'aménagement hydro-agricole sur mesure du parcellaire constitue aussi une importante ligne de défense agroenvironnementale.

Parallèlement aux applications en gestion de l'eau, la réalisation du projet GRISE a soutenu la mise au point technique et la validation d'une méthode de reconnaissance de la variabilité des sols fondée sur l'analyse du relief de haute précision généré au moyen du LiDAR. La reconnaissance de types contrastés de sol à l'échelle de la ferme constitue un atout stratégique à l'égard de la régie du parcellaire en culture. Complémenté par un échantillonnage localisé des sols, l'outil développé pave la voie à une gestion localisée du parcellaire permettant par exemple de moduler les corrections de l'acidité du sol par l'épandage de chaux à taux variable, d'ajuster la richesse du sol en certains nutriments, ou d'adapter la pratique culturale à la texture et autres conditions physiques du sol.

Globalement, la réalisation du projet a ainsi permis de répondre à ses trois objectifs initiaux.

Objectif 1 : *Supporter le diagnostic et l'intervention sur mesure dans l'aménagement hydro-agricole du parcellaire.*

La réalisation du projet a permis d'offrir aux entreprises agricoles de territoire à l'étude un ensemble d'informations à référence spatiale qui caractérisent de façon très précise les patrons spatiaux d'égouttement et de ruissellement de leurs terres. Ces informations clés ont été diffusées sous deux formats, soit en format de cartes « papier » auprès des producteurs et en format d'atlas électroniques auprès des conseillers agricoles. Les informations à référence spatiale mises à la disposition des producteurs et conseillers incluent notamment :

- Les images multispectrales acquises au printemps 2006. Captées quelques jours après une importante précipitation, celles-ci possèdent une qualité interprétative remarquable de l'égouttement des terres;
- L'indice de brillance. Dérivé des images multispectrales, cet indice permet de localiser rapidement les zones les moins bien égouttées et les plus vulnérables à la contamination diffuse de l'eau de surface;
- Le modèle numérique d'altitude (MNA) caractérise de façon continue la microtopographie des champs, une information essentielle à l'aménagement du drainage de surface du parcellaire;
- Les parcours de l'eau et les délimitations des micro-bassins apportent une connaissance précise de l'hydrologie de surface des champs. La visualisation du cheminement de l'eau à la surface des champs et la segmentation du parcellaire en micro-bassins sont des informations géographiques de grande valeur dans la planification d'ouvrages de contrôle du ruissellement de surface;
- Les critères techniques de conception des structures hydro-agricoles, dérivés du MNA et des données pédologiques, ont été associés à l'ensemble des micro-bassins du territoire à l'étude. Intégrés à l'atlas électronique, ils fournissent l'ensemble des informations pertinentes au dimensionnement optimal des structures de contrôle du ruissellement.

Objectif 2 : *Réduire l'intensité du ruissellement de surface et prévenir la contamination diffuse des eaux de surface*

Les zones mal égouttées du parcellaire génèrent un ruissellement de surface abondant qui contribue à la plus grande part des exportations diffuses de sédiments (érosion), nutriments (phosphore et ammoniac), microbes pathogènes et pesticides vers les ruisseaux. La correction des déficiences dans l'égouttement du parcellaire contribue ainsi à réduire, à la source, la contamination diffuse de l'eau. Les cartographies de l'égouttement, des parcours du ruissellement et du risque d'érosion intégrées aux cartes et atlas électroniques du projet GRISE constituent des outils de première ligne dans la définition des priorités d'intervention en vue de prévenir la contamination diffuse des eaux de surface.

Dans une perspective d'appui à l'action agroenvironnementale ciblée sur la qualité du sol et de l'eau, l'atlas électronique produit dans le cadre du projet GRISE est complémentaire aux autres outils de gestion du parcellaire accessibles au producteur et au conseiller agricole, tels que l'ODEP (Outil de diagnostic des exportations de phosphore, Michaud et coll., 2008) et les logiciels de planification de la fertilisation agroenvironnementale (PAEF). L'ODEP est un outil informatique permettant d'estimer la vulnérabilité d'une parcelle donnée au ruissellement, à l'érosion et aux exportations de phosphore selon les propriétés du sol, le relief, l'aménagement des terres et différents scénarios de pratiques culturales. Les atlas générés par le projet GRISE rendent disponibles aux conseillers et producteurs agricoles les données géophysiques nécessaires à son application. Rappelons par ailleurs que l'ODEP dispose d'une interface avec les deux principaux outils de planification agroenvironnementale de la fertilisation (PAEF) utilisés par les conseillers agricoles québécois. Ensemble, les atlas électroniques GRISE, l'outil d'analyse du risque environnemental ODEP et les outils de gestion de la fertilisation constituent un coffre à outils bien adapté à l'action agroenvironnementale concertée en milieu agricole.

Objectif 3 : *Subdiviser les parcelles agricoles en unités homogènes de sol requérant les mêmes besoins en termes de nutriments et d'aménagement*

La réalisation du projet GRISE a permis de mettre au point et de valider une méthode de reconnaissance de la variabilité spatiale des propriétés des sols fondée sur l'analyse des données de relief de haute précision générées par le LiDAR. L'étude confirme d'une part les capacités prédictives du logiciel LandMapR® dans la segmentation du paysage en unités de sol présentant des caractéristiques distinctes au plan de l'égouttement, de la forme du relief et des propriétés du sol. D'autre part, l'étude a permis d'adapter cette approche de segmentation du MNA aux données de relief de haute précision générées par le LiDAR, une réalisation inédite à notre connaissance en Amérique du nord. La validation de l'approche mise en œuvre à l'échelle de la parcelle (1:7 500) et du territoire (1:20 000 et 1:40 000) sur la base de mesures et d'observations pédologiques témoigne d'un fort potentiel d'application en gestion localisée du parcellaire et en cartographie pédologique.

Dans une perspective de recherche et développement, une suite logique à ces travaux serait de mettre à contribution d'autres données à référence spatiale de façon à compléter le pouvoir explicatif du relief dans l'expression des propriétés du parcellaire. Le logiciel de LandMapR® est d'ailleurs adapté au processus de classification floue, qui permet d'intégrer plusieurs variables continues dans la génération de zones de sol. Des travaux en ce sens sont actuellement en cours au sein de l'équipe de géomatique agricole de l'IRDA (Sylvain et coll., 2009). Les indices de brillance, la cartographie de la conductivité électrique du sol, les indices de végétation dérivés de la télédétection (NDVI) ou les cartes de rendement sont autant d'observations à référence spatiale pouvant contribuer à mieux cerner la variabilité des propriétés hydropédologiques du parcellaire et son influence sur la productivité des productions végétales. Les résultats de la présente étude, bien que limitée à trois champs et deux territoires, témoignent cependant de l'intérêt de l'approche de segmentation du MNA comme assise dans la reconnaissance de la variabilité des propriétés hydropédologiques du sol.

2.4 Impact

Les retombées de la réalisation du projet GRISE se mesurent à court terme, dans l'appui à l'action concertée en cours dans la mise en valeur du bassin versant de la baie Missisquoi, de même qu'à plus

long terme, en contribution au développement et à l'accessibilité des technologies de l'information à référence spatiale auprès de l'ensemble de la communauté agricole québécoise.

Action concertée régionale

Des cartographies hydropédologiques du parcellaire ont été offertes à chacune des entreprises agricoles participant au projet d'actions concertées Lisière Verte (CSBVRB, 2007). Les cartes ont été produites sur la base des plans de ferme individuels, suivant l'approbation de leur divulgation auprès de La Financière. Vingt-sept entreprises agricoles ont ainsi fait la demande et reçu des cartes plastifiées caractérisant le parcellaire de leur entreprise agricole. Cette cartographie individualisée et réalisée par l'équipe de géomatique de l'IRDA couvre 400 parcelles, pour un total de 2 260 hectares, soit près de la moitié du territoire couvert par le projet. Suivant les demandes éventuelles d'autres producteurs, l'équipe de l'IRDA s'engage à rendre disponibles les cartes hydropédologiques du parcellaire de la région à l'étude. Ces cartographies fines de l'égouttement du parcellaire et de la variabilité des sols mises à la disposition des producteurs et de leurs conseillers s'inscrivent en support à l'action concertée de la Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière Aux Brochets et de ses partenaires régionaux dans la mise en valeur du bassin versant de la Baie Missisquoi.

Transfert et développement d'expertise

La réalisation du projet GRISE s'inscrit en continuité de l'engagement de l'IRDA en recherche-action auprès des partenaires régionaux pour la mise en valeur de la Baie Missisquoi au cours des dix dernières années. Les nombreux dispositifs d'étude des milieux terrestres et aquatiques implantés dans cette région-laboratoire ont permis le développement et la validation de plusieurs outils de gestion des sols et de l'eau, à l'échelle du parcellaire comme à celle du territoire. L'adaptation du modèle SWAT aux conditions agroclimatiques québécoises (Michaud et coll., 2008), le développement et la validation de l'ODEP (Michaud, 2008) et les outils de gestion à référence spatiale développés dans le cadre du projet GRISE sont autant de développements initiés dans la région d'étude, qui profitent maintenant à d'autres régions agricoles québécoises et hors Québec. Mentionnons à ce titre le recours aux survols LiDAR supervisés et traités par l'équipe de l'IRDA en appui aux actions concertées sur la prévention de l'érosion des sols dans les bassins versants des rivières Saint-Louis et Petit-Pot-au-Beurre, en Montérégie (UPA et coll., 2006), de même qu'en appui à la réalisation de l'atlas agroenvironnemental du bassin versant du Black Brook au Nouveau-Brunswick (Deslandes et coll., 2009). Par ailleurs, les pédologues impliqués dans le projet reconnaissent la pertinence de cet outil dans la segmentation des pédo-paysages et la différenciation des délimitations cartographiques des séries de sol et ils prévoient recourir à cette approche dans leurs activités de prospection pédologique.

Recherche et développement

Les méthodes et outils développés dans le cadre du projet GRISE s'inscrivent dans un processus de recherche et développement en géomatique agricole en constante évolution, tirant profit d'opportunités technologiques émergentes tant dans la génération de nouveaux types de données qu'à leur traitement en vue de diverses applications. Trois nouveaux projets de recherche et développement, soutenant autant d'étudiants gradués à l'université de Sherbrooke et à McGill, sont redevables à GRISE. Sunborg et coll. (2008) mettent en valeur les relevés LiDAR dans l'explication des processus érosifs dans les reliefs plats de la Basse Yamaska. Le potentiel de LandMapR© dans la gestion de la variabilité spatiale des propriétés du sol fait aussi l'objet de travaux de R&D dans d'autres régions agricoles (Sylvain et coll., 2009). Cette étude vise à valider l'approche développée dans le support à la cartographie pédologique et à la gestion localisée des sols pour des régions présentant des paysages radicalement différents de ceux étudiés dans le cadre du projet GRISE. À terme, il est estimé que cette approche de segmentation du relief, en appui à la gestion localisée du parcellaire, pourrait profiter à l'ensemble des entreprises agricoles québécoises. La disponibilité de données à référence spatiale relatives au relief, d'une précision altimétrique adéquate, demeure cependant le principal facteur limitant une application généralisée de cet outil de gestion du parcellaire. En alternative aux captures de données LiDAR, qui présentent un coût relativement important, la génération de modèles numériques de surface (MNS) à partir de stéréo-modèles de photos aériennes pourrait favoriser l'accessibilité à cette approche de gestion localisée du parcellaire. Cette technologie toute récente développée au Québec (SimActive, 2008) est actuellement en

cours d'évaluation à l'IRDA. Enfin, l'atlas du bassin versant du ruisseau Ewing réalisé dans le cadre du projet GRISE supporte un vaste projet de caractérisation de la mobilité du phosphore en surface et dans les drains agricoles (Poirier et coll., 2008). La caractérisation hydropédologique du bassin supportée par GRISE a notamment soutenu la conception du dispositif expérimental de cette étude et profitera à l'interprétation des résultats.

2.5 Diffusion des résultats

L'ensemble des données et applications à référence spatiale générées par le projet GRISE ont été intégrées dans un atlas électronique et mises à la disposition des principaux intervenants régionaux en appui à l'action concertée sur la réduction des charges de phosphore dans la baie Missisquoi, notamment la Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière Aux Brochets et de ses conseillers, le Centre de services du MAPAQ de Bedford et le club conseil en agroenvironnement Dura-Club. En parallèle, les vingt-sept entreprises du bassin versant du ruisseau Ewing qui en ont fait la demande ont profité de l'édition de cartes couleurs personnalisées de leur parcellaire. Celles-ci représentent l'image multispectrale, l'indice d'égouttement des sols, ainsi que les informations dérivées du LiDAR, incluant le modèle numérique d'altitude, les parcours de l'eau et la délimitation des micro-bassins à l'échelle intra-parcellaire pour chacun de leurs champs.

La réalisation du projet GRISE a par ailleurs été accompagnée de plusieurs activités de diffusion auprès des utilisateurs ciblés de la région à l'étude, de même qu'auprès d'intervenants du domaine agroenvironnemental ailleurs au Québec. Les méthodes développées et les résultats du projet GRISE ont aussi fait l'objet de communications scientifiques à l'occasion de forums spécialisés au Québec, au Vermont et en Europe. Le tableau 9 présente les principales activités de diffusion auxquelles l'équipe de projet a été appelée à participer. Dans l'ensemble, onze communications ont été présentées auprès d'audiences provenant des milieux agricole, municipal et de la recherche scientifique.

Tableau 8: Activités de diffusion des résultats et de transfert technologique associés au projet GRISE.

<i>Activités prévues</i>	<i>Activités réalisées pour la période couverte par le rapport</i>	<i>Description (thème, titre, endroit, etc.)</i>	<i>Date de réalisation</i>	<i>Nombre de personnes rejointes</i>	<i>Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention)</i>
Atelier et formation	Formation LandMapR©	Cette formation s'adressait aux partenaires de réalisation du projet GRISE. Elle visait à présenter le logiciel LandMapR et à préciser les approches qui allaient être adoptées pour produire et valider la classification du territoire en unités homogènes de gestion.	13 février 2007	10	Mention orale du financement CDAQ et de partenariat avec AAC
	Constitution d'un forum d'utilisateurs <i>(Document de diffusion fourni dans le rapport d'étape de juillet 2007)</i>	Présentation à Bedford des outils de télédétection utilisés dans le projet GRISE. Cette présentation s'adressait aux producteurs et conseillers impliqués dans la Coopérative Bassin versant de la rivière Aux Brochets. Des représentants municipaux et de la Corporation bassin versant de la Baie Missisquoi étaient également présents.	5 avril 2007	40	Logo et mention orale du financement CDAQ et de partenariat avec AAC
	Atelier d'échange du Plan d'action concertée 2007-2010 sur l'agroenvironnement et la cohabitation harmonieuse, Drummondville	Titre : Coffre à outils pour la mise en œuvre des projets de gestion intégrée de l'eau en milieu agricole : les indicateurs agroenvironnementaux.	28 janvier 2008	20	Logo du CDAQ et AAC
	Atelier d'échange : Géomatique appliquée à la régie des sols : pour des terres bien égouttées et une eau propre <i>(Document de diffusion fourni dans le rapport d'étape de juillet 2007)</i>	Titre : Modèle numérique d'altitude : Le LiDAR est-il à la hauteur de nos besoins?	21 janvier 2008	100	Logo du CDAQ et AAC
	Formation sur GvSIG	Atelier de formation sur un SIG gratuit (GvSIG) pour faciliter la consultation et la manipulation des données acquises dans le cadre du projet GRISE.	1-3 octobre 2008	Un conseiller de la coopérative de solidarité de la rivière Aux Brochets	Mention CDAQ et AAC

Activités prévues	Activités réalisées pour la période couverte par le rapport	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention)
Colloque Conférence et poster	Journée de l'Observatoire et du développement durable de l'Université de Sherbrooke (<i>document de diffusion fourni dans le rapport d'étape de juillet 2007</i>)	Titre : Les données de relief de précision LIDAR au service de la gestion localisée du parcellaire agricole.	29 mars 2007	50	Logo du CDAQ
	Colloque de l'AQSSS, utilisation et productivité des sols négligés à Saint-Georges-de-Beauce	Titre : Application des données LiDAR dans la gestion des sols et de l'eau.	5 juin 2008	100	Logo du CDAQ et AAC
	7 ^e édition du Salon des technologies environnementales du Québec. RÉSEAU environnement. Centre des congrès de Québec	Titre : Diagnostic et contrôle des sources diffuses de phosphore en bassin versant rural.	1 ^{er} avril 2008	300	Logo du CDAQ et AAC
	The Champlain Conference: Our lake, our future. Lake Champlain Research Consortium and the Lake Champlain Basin Program. Sheraton Conference Center, Burlington	Titre : Hydropedological segmentation and characterization for enhanced water management.	9 janvier 2008	100	Logo du CDAQ et AAC
	Congrès conjoint AQSSS-SCSS à la station touristique de Duchesnay (<i>document de diffusion fourni dans le rapport d'étape de juillet 2007</i>)	Titre : Use of LIDAR data and multispectral images for hydrological diagnostic and hydro-agricultural management: a case study on the Ewing Creek, located in Montérégie Est, Québec (présentation orale).	6 juin 2007	30	Logo et mention orale du financement CDAQ et de partenariat avec AAC
	Congrès conjoint AQSSS-SCSS à la station touristique de Duchesnay (<i>document de diffusion fourni dans le rapport d'étape de juillet 2007</i>)	Titre : Les données de relief de précision LIDAR au service de la prospection pédologique détaillée à l'échelle du parcellaire agricole (affiche).	4-5-6 juin 2007	200	Logo et mention orale du financement CDAQ et de partenariat avec AAC
	Présentation à l'ACFAS (<i>Document de diffusion fourni dans le rapport d'étape de juillet 2007</i>)	Titre : Cartographie de l'égouttement des sols agricoles et des zones de concentration des eaux de ruissellement à l'aide de la télédétection.	8 mai 2007	20	Logo et mention orale du financement CDAQ et de partenariat avec AAC
	Présentation orale au à Québec s'adressant au personnel du MAPAQ (<i>document de diffusion fourni dans le rapport d'étape de juillet 2007</i>)	Titre : Outils de gestion de précision du parcellaire : applications de la télédétection en régie des sols, des cultures et de l'eau.	19 juin 2007	50	Logo et mention orale du financement CDAQ et de partenariat avec AAC
	Carrefour des gestions locales de l'eau, Rennes, France organisée par l'Association française pour l'étude des sols (AFES) et le Conseil scientifique de l'environnement de Bretagne (<i>document de diffusion fourni dans le rapport d'étape de juillet 2007</i>)	Titre : Prévention des transferts diffus de phosphore en bassins versants agricoles : Perspectives québécoises et nord-américaines.	1er février 2007.	400	Logo CDAQ et AAC

HISTOIRE D'UNE RÉUSSITE

Le projet GRISE (gestion raisonnée et intégrée des sols et de l'eau) a tiré profit des avancées technologiques récentes dans l'acquisition aéroportée et l'analyse spatiale de données de télédétection, en support au développement d'outils spécifiquement adaptés à la régie des sols et l'aménagement hydro-agricole du parcellaire. Compte tenu des conditions agro-climatiques propres au Québec, l'égouttement des terres agricoles et la condition physique des sols viennent en tête de liste des facteurs limitant les rendements et la qualité des récoltes. Les zones mal égouttées sont non seulement associées à de faibles rendements des cultures, mais aussi à une vulnérabilité élevée au ruissellement de surface. Aussi, la correction des problèmes d'égouttement des champs en culture contribue à préserver la productivité du parcellaire et à réduire à la source l'exportation diffuse de sédiments, de nutriments, pesticides ou microbes pathogènes vers les cours d'eau et les lacs. À l'échelle de la ferme, les diagnostics d'égouttement du parcellaire développés dans le cadre du projet GRISE permettent de localiser et d'aménager sur mesure les zones des champs les plus vulnérables aux processus de ruissellement et d'érosion, principaux vecteurs de la pollution diffuse des cours d'eau agricoles. La réalisation du projet a par ailleurs démontré la pertinence de ces outils de gestion dans un cadre d'actions concertées à l'échelle du bassin versant. Le projet GRISE s'est en effet inscrit en support aux actions d'une communauté d'entreprises agricoles, regroupées au sein de Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière Aux Brochets, dédiée à la mise en valeur du principal tributaire de la Baie Missisquoi (Lac Champlain), en Montérégie.

Les résultats du projet confirment la valeur des images multispectrales dans l'interprétation de la qualité du drainage du parcellaire. L'indice de brillance des sols, dérivé des images brutes, rehausse le pouvoir explicatif des images dans la représentation spatiale de l'humidité du sol. Les modèles numériques d'élévation de haute précision, générés au moyen de la technologie LiDAR, complètent cet indicateur de l'égouttement du sol en apportant une représentation précise des parcours du ruissellement de surface. Le projet GRISE a permis de valider la précision de cette technologie fondée sur l'émission-réception de faisceaux laser. La comparaison des relevés topographiques très fins du territoire de 50 km² à l'étude avec des captures GPS au sol situe en effet les écarts des mesures altimétriques entre 7 et 11 cm.

Dans un cadre d'actions concertées à l'échelle du bassin versant, le projet GRISE a démontré l'utilité des relevés LiDAR au diagnostic et à l'interprétation des problèmes d'égouttement, à la quantification et la représentation spatiale des hauteurs de ruissellement et des taux d'érosion à l'échelle intra-parcellaire, de même qu'à la conception de travaux d'aménagement des terres. Les analyses hydrologiques dérivées du LiDAR permettent de dériver les informations requises dans le dimensionnement optimal des structures de contrôle du ruissellement, telles que les patrons d'écoulement des eaux de surface, les pentes longitudinale et transversale de la parcelle ainsi que la configuration et les superficies drainées par les micro-bassins. Les MNA dérivés du LiDAR ont par ailleurs contribué au développement d'une méthodologie de prédiction des hauteurs de ruissellement et des taux nets d'érosion, appliquée à l'ensemble du territoire à l'étude. Une telle quantification du risque de ruissellement et de l'érosion constitue un outil complémentaire à la représentation spatiale de l'égouttement et du ruissellement dans l'identification des priorités d'intervention et l'étude de scénarios alternatifs de gestion du parcellaire.

En parallèle aux applications en gestion de l'eau, l'outil de gestion développé dans le cadre du projet GRISE a supporté le développement d'une méthode de cartographie de la variabilité spatiale des propriétés du sol adaptée aux données LiDAR. Cette subdivision du parcellaire en unités homogènes de sol a pour but de soutenir la modulation intra-parcellaire de la régie des sols et des cultures (gestion localisée ou par zones). L'approche retenue consiste à reconnaître, puis à distinguer les propriétés hydro-pédologiques des zones du parcellaire en fonction de leur position dans le paysage du bassin versant. Les résultats du projet démontrent l'efficacité du logiciel LandMapR® (MacMillan et coll., 2000) dans la segmentation du paysage en unités distinctes sur la base de ses attributs topographiques, puis à la classification de ces entités au plan hydro-pédologique. La validation de l'approche de segmentation a été supportée par des prospections pédologiques à diverses échelles d'étude, soit à l'échelle de trois champs échantillonnés de façon intensive (1:7 500), de même qu'à l'échelle des bassins versants des

ruisseaux Ewing (1:20 000) et Walbridge (1:40 000). À l'échelle intra-parcellaire, 120 profils de sol ont été décrits, échantillonnés et dosés en laboratoire afin de valider l'adéquation de la classification hydropédologique produite par LandMapR© avec la réalité terrain. La validation de la segmentation hydropédologique aux échelles 1:20 000 et 1:40 000 a pour sa part profité de la caractérisation de 360 profils de sol. Dans l'ensemble, les prospections pédologiques valident l'approche de segmentation du paysage soutenue par LandMapR© dans la discrimination spatiale des propriétés du parcellaire au plan hydropédologique. Cette première, à l'échelle nord-américaine, à notre connaissance, pave la voie à l'exploitation des MNA de haute précision dans la gestion localisée des sols au Québec.

La reconnaissance de la variabilité des propriétés du sol à l'échelle intra-parcellaire constitue un atout stratégique à l'égard de la régie des sols, de l'eau et des cultures. Complémentée par un échantillonnage localisé des sols par zone, cette segmentation permettra, par exemple, de corriger sur mesure l'acidité du sol, de rehausser le taux de matière organique ou la fertilité d'une zone appauvrie, ou d'adapter la pratique culturale au groupe textural et autres conditions physiques du sol. Retenons cependant que la segmentation du MNA constitue une première étape en gestion localisée du parcellaire. Une deuxième étape doit faire intervenir l'échantillonnage spatial des zones proposées par la segmentation hydropédologique de façon à s'assurer que les différences dans les propriétés d'intérêt sont significatives et justifient une gestion différenciée des zones. L'approche de segmentation du paysage demeure ainsi un outil de gestion de la variabilité spatiale des propriétés du sol, complémentaire et avantageusement utilisé en amont de la démarche d'échantillonnage de la parcelle. Soulignons enfin que le projet GRISE témoigne de l'applicabilité de l'approche de segmentation du MNA mise à l'essai dans la région du piedmont appalachien. La validation de cette approche dans d'autres régions agricoles, associées à des paysages plus accidentés ou plats, demeure une importante priorité de recherche.

La réalisation du projet GRISE s'inscrit dans un processus continu de renforcement des capacités de gestion du secteur des productions végétales au Québec au moyen des technologies de l'information à référence spatiale. La mise à la disposition auprès des producteurs et conseillers agricoles d'outils de haute précision en matière de gestion des sols, des cultures et de l'aménagement hydro-agricole du parcellaire répond à la fois aux impératifs de conservation à long terme de la productivité des sols, du maintien de la compétitivité des entreprises et de la prévention de la contamination diffuse des eaux de surface. Le cadre de l'action concertée à l'échelle du bassin versant est particulièrement favorable à ce type de développement et à son transfert auprès des utilisateurs. Au terme du projet, 27 entreprises agricoles ont demandé et reçu des cartes caractérisant leur entreprise agricole. Ceci représente 400 parcelles qui couvrent 2 260 hectares, soit près de la moitié du territoire couvert par le projet. De plus, l'ensemble des données acquises dans le cadre du projet ont été intégrées dans un atlas électronique et transmis aux conseillers agricoles locaux, en support à leurs activités de services-conseils en agroenvironnement. En marge de ces résultats techniques et scientifiques, la réalisation du projet GRISE témoigne des bénéfices associés à une approche de recherche-action participative, reposant sur l'implication des utilisateurs au fil du développement des outils.

PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES

L'ensemble des informations pertinentes au suivi du plan de financement du projet GRISE et à la conciliation de ses dépenses sont présentées dans un second document remis avec ce rapport. L'ensemble des copies de factures relatives aux différents budgétaires du projet y sont présentées.

Références

- Akan, A. Osman. 2002. Modified rational method for sizing infiltration structures. *Can. J. Civ. Eng.*, Vol. 29, p. 539-542.
- Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière Aux Brochets (CSBVRB). 2007. Contribution des agriculteurs à la production de biens et services environnementaux dans des sous-bassins ciblés de la Baie Missisquoi. Programme pour l'avancement du secteur canadien de l'agriculture et de l'agroalimentaire (PASCAA).
- Deslandes, J., Y. Saint-laurent et J. Belvisi. 2009. Atlas électronique du bassin versant Black Brook. Diagnostic de l'érosion dans deux bassins versants situés au Québec et au Nouveau-Brunswick et transfert d'expertise technique pour accélérer l'adoption de PGB. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Québec, Québec.
- Lead, S. 2003. Divide line by adding points evenly, Script for ArcView GIS, Avenue, www.esri.com.
- DeLaune, M. 2003. XTools fro ArcView 3.x, Avenue, www.esri.com. Documentation: http://www.odf.state.or.us/DIVISIONS/management/state_forests/GIS/Documents/xtools.htm.
- Fridgen, J.J., C.W. Fraisse, N.R. Kitchen et K.A. Sudduth. 2000. Delineation and analysis of site-specific management zones. Second International Conference on Geo-spatial Information in Agriculture and Forestry, Florida, 10-12 January 2000.
- MacMillan, R.A., W.W. Pettapiece, S.S. Nolan et T.W. Godard. 2000. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 113, p. 81-109.
- Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C. A. Madramootoo. 2007. SWAT-predicted influence of different landscape and cropping systems alterations on phosphorus mobility within the Pike River watershed of South-western Quebec. 2007. *Canadian Journal of Soil Science* 87(3) 329-344.
- Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beaudet et J. Lagacé. 2008. ODEP, un outil de diagnostic des exportations de phosphore. Projet « Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec », réalisé dans le cadre de l'Initiative d'appui aux conseillers agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada.
- Miller, M. 2003. Auto increment a field, Script for ArcGIS Desktop, Visual Basic, www.esri.com.
- Poirier S.-C., A.R. Michaud et J. Whalen. 2008. Mobilité et spéciation du phosphore dans le ruissellement de surface et les drains agricoles. Projet de thèse de Doctorat, Département des sciences naturelles. Université McGill.
- Rivest, R. et S. Gosselin. 2002. Mesures de précision du relief pour la gestion du sol et de l'eau. In *Lake Champlain in the new millenium*, 2002 Spring Symposium. Lake Champlain Research Consortium, Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, p. 46-47.
- Simard, P. 2008. Correlator3D™ - Générer des MNE devient simple et rapide. SimActive. Montréal, Québec. <http://www.SimActive.comcontact@SimActive.com>
- Sylvain, J.-D., A.R. Michaud et G. Béné. 2009. Délimitation du comportement hydropédologique des sols à l'aide de données de relief de précision LIDAR et d'une image multispectrale aéroportée. Projet de thèse de Maîtrise, Département de géomatique appliquée de l'Université de Sherbrooke.

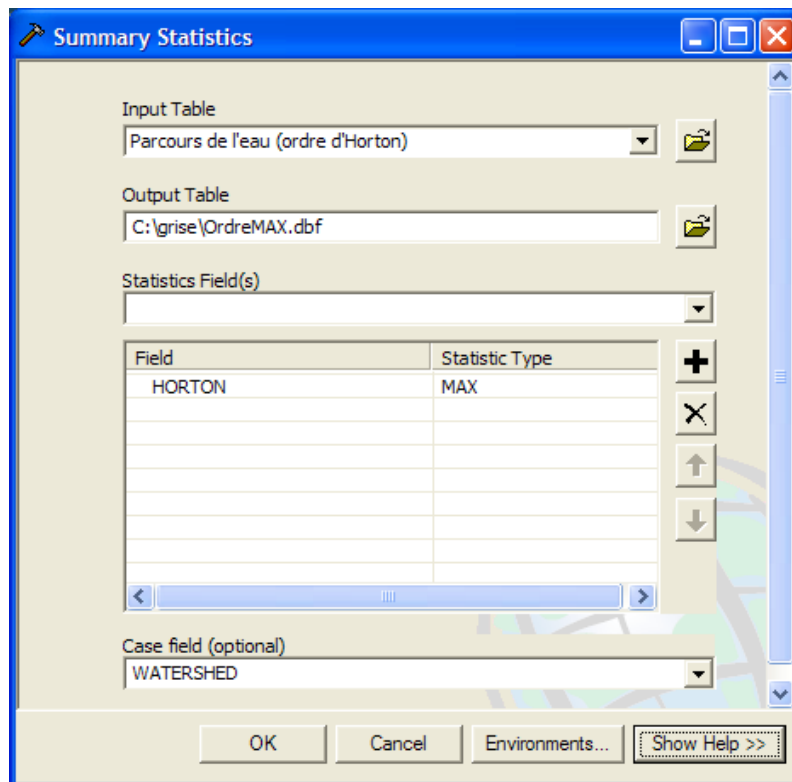
- Sunborg, M., A.R. Michaud et R. Fournier. 2008. Localisation des zones sensibles au transport des polluants par le ruissellement de surface dans un bassin versant agricole. Projet de thèse de Maîtrise, Département de géomatique appliquée de l'Université de Sherbrooke.
- Statistical analysis system (SAS). 2000. SAS 8.0 for Windows and SAS/STAT software and user's guide. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Schulze, D.G., J.L. Nagel, G.E. Von Scoyoc, T.L. Henderson, M.F. Baumgardner, et D.E. Stott. 1993. Significance of organic carbon in determining soil colors, p. 71–90. In J.M. Bigham et E.J. Ciolkosz (ed.) Soil Color. SSSA Spec. Publ. 31, SSSA, Madison, WI.
- Stämpfli, N., R. Beaulieu, I. Breune et M. Guillou. 2007a. Fiche technique : Évaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants agricoles du Québec. Agriculture et Agroalimentaire Canada et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec. 6 p.
- Stämpfli, N., R. Beaulieu, I. Breune et M. Guillou. 2007b. Fiche technique : Calculs pour le dimensionnement des avaloirs. Agriculture et Agroalimentaire Canada et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, 4 p.
- Union des producteurs agricoles (UPA) de Saint-Hyacinthe, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Agence géomatique montérégienne GéoMont, Direction de la Montérégie-Est du MAPAQ, Centre de conservation des sols et de l'eau de l'Est du Canada, Conseil de gestion du bassin versant de la Yamaska, Département de géomatique appliquée de l'Université de Sherbrooke. 2007. Diagnostic de l'érosion dans deux bassins versants situés au Québec et au Nouveau-Brunswick et transfert d'expertise technique pour accélérer l'adoption de pratiques de gestion bénéfiques. Volet aide technique régionale du programme de couverture végétale du Canada. Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, Chapters 4-10.

ANNEXE A : MÉTHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CONTRÔLE DU RUISSELLEMENT À L'AIDE DES DONNÉES LIDAR

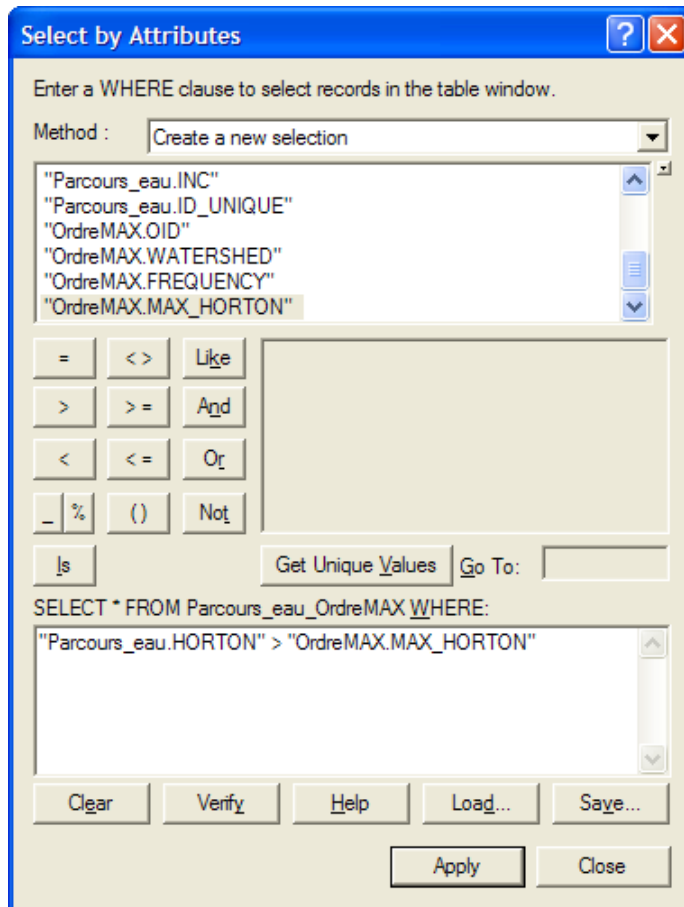
Évaluation de la longueur maximale du parcours de l'eau

Tel que mentionné dans le rapport d'étape du projet GRISE, l'analyse du MNA avec le module WATERSHED du logiciel TNTmips® a permis de dériver les patrons d'écoulement de l'eau. Les cheminements de l'eau à la surface des champs sont définis par des segments qui sont ordonnés selon la méthode de Horton. Lorsque le segment n'est pas situé aux extrémités d'un parcours de l'eau, celui-ci est délimité par deux intersections. Voici les étapes qui permettront de définir la longueur maximale du parcours de l'eau de l'ensemble des micro-bassins à l'étude :

1. Attribuer un identifiant unique à chaque micro-bassin avec le script « *Auto Increment a field* » disponible sur le site d'ESRI (www.esri.com). Cet incrément sera subséquemment nommé *ID_UNIQUE*;
2. Pour chaque segment du parcours de l'eau, transférer l'identifiant unique du micro-bassin auquel il appartient à l'aide d'une jointure spatiale;
3. Dans la couche des parcours de l'eau, créer un champ qui contient un identifiant agrégeant l'ordre Horton des segments du parcours de l'eau et l'identifiant du micro-bassin auquel il appartient (cet attribut sera subséquemment nommé *HortonBV*);
4. À l'aide de la fonction *Dissolve* du *Data Management Tools*, agréger les parcours de l'eau eu fonction de l'identifiant « *HortonBV* »;
5. Effectuer une requête dans la table avec la fonction *Summary Statistics* du *Analysis Tools* pour trouver l'ordre le plus élevé de chaque micro-bassin. Le résultat de cette requête est une table .DBF.



6. Joindre la table résultante (dans l'exemple elle se nomme *OrdreMAX.dbf*) à l'aide de l'identifiant des micro-bassins (*ID_UNIQUE*, créé à l'étape 1).
7. Effectuer une requête pour supprimer les parcours de l'eau qui ne possèdent pas l'ordre Horton le plus élevé et qui ne sont donc pas les plus longs.

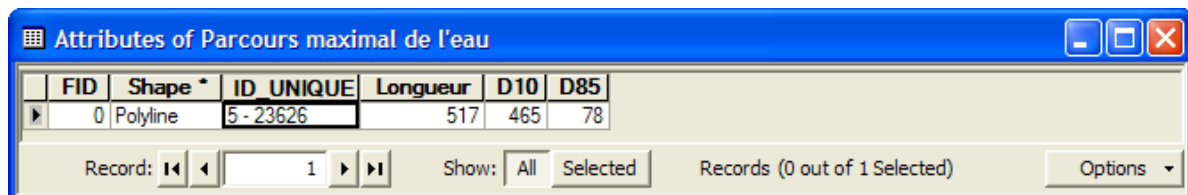


8. Évaluer la longueur des polygones les plus longues et transférer cette longueur à la table des micro-bassins à l'aide d'une jointure de table.

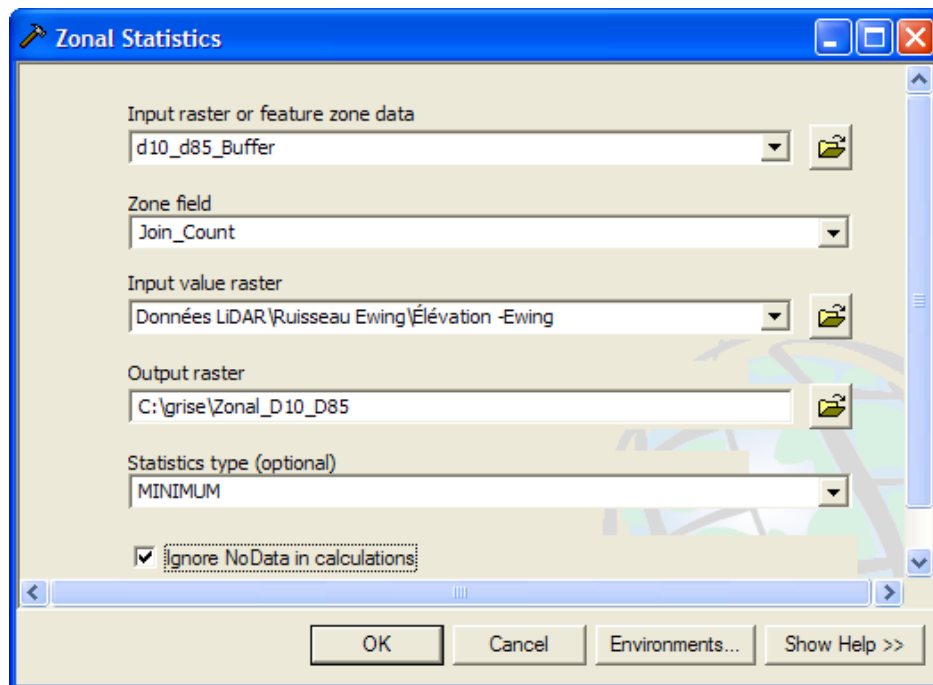
Évaluation de la pente longitudinale

La pente longitudinale moyenne d'un micro-bassin est calculée à partir des points situés à 10 et 85 % de la longueur maximale du parcours de l'eau (*L*) en partant du point le plus loin de l'exutoire (Stämpfl et coll., 2007).

1. Afin de calculer puis de stocker la distance des points situés à 10 et 85 % de la longueur maximale du parcours de l'eau, ajouter deux colonnes de nombres entiers à la table des attributs des *parcours maximums de l'eau*.



2. Ensuite, ajouter des points à tous les mètres le long des *parcours maximums de l'eau* à l'aide de l'extension « *Divide line by adding points evenly* » de ArcView GIS. Pour chaque point ajouté par cette extension, une distance est calculée automatiquement. Le fichier ainsi créé sera référencé par le nom *points –distance de 1 mètre*;



6. Les attributs altimétriques ainsi dérivés sont intégrés dans la table *parcours maximaux de l'eau* par le biais d'une jointure de table réalisée à l'aide de l'identifiant unique (*ID_UNIQUE*). La pente est ensuite dérivée à partir de l'équation suivante :

$$Pente = \frac{(Z_{D10\%} - Z_{D85\%})}{(D_{10\%} - D_{85\%})} * 100$$

où : **Pente**: Pente longitudinale du micro-bassin (%)

D_{xx%} : Distances évaluées à 10 ou 85 % du point le plus loin de l'exutoire sur le parcours principal de l'eau du micro-bassin

Z_{Dxx%} : Élévation maximale de la zone tampon circulaire de 5 mètres localisée aux distances D_{10%} et D_{85%}

7. Transférer le résultat du calcul dans la table de la couche des micro-bassins.

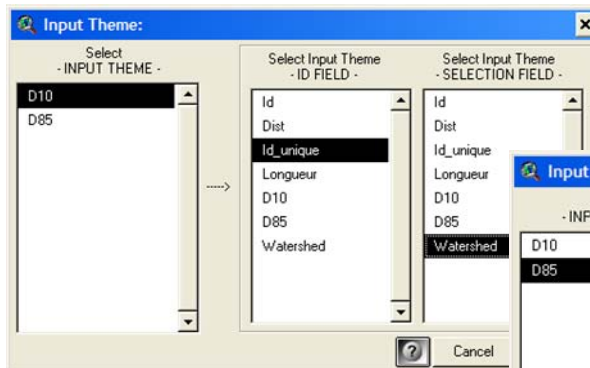
Pente latérale

Peu de fonctions permettent d'extraire la pente latérale d'un bassin. Plusieurs stratégies peuvent être développées afin de parvenir à son évaluation. Celle que nous avons développée est basée sur l'utilisation de la perpendiculaire à l'azimut entre les points D_{10%} et D_{85%}. À l'aide de cette perpendiculaire, qui unira le parcours de l'eau maximal et la limite du micro-bassin correspondant, il sera possible d'évaluer une pente latérale pour chaque micro-bassin.

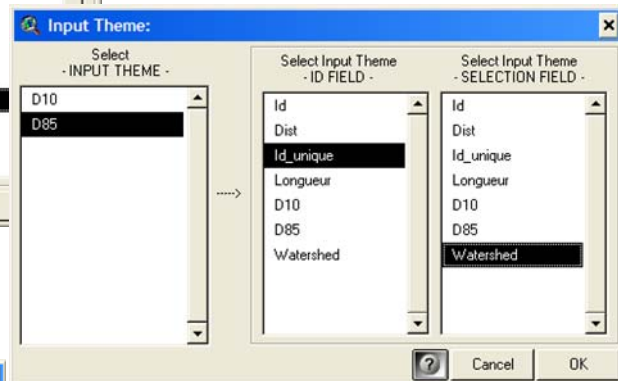
Une petite gymnastique a dû être accomplie afin d'évaluer la pente latérale de façon semi-automatique puisque seuls les utilitaires déjà existants ont été utilisés. Néanmoins, ArcView 3.x. a dû être utilisé puisque les scripts nécessaires ne sont pas tous encore disponibles dans ArcGIS.

1. Pour exécuter cette procédure, il faut d'abord isoler les points D_{10%} et D_{85%} de l'ensemble des micro-bassins dans 2 fichiers *shapefile* séparés qui seront identifiés subséquentement dans le texte par *D10.shp* et *D85.shp*.
2. S'assurer que la base de données associée aux fichiers *D10.shp* et *D85.shp* contient, pour chaque point, l'identifiant unique des micro-bassins.

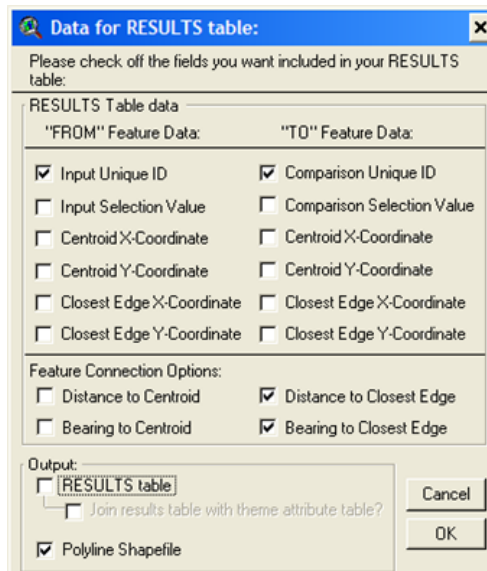
3. Extraire l'azimut entre les points $D_{10\%}$ et $D_{85\%}$ avec l'extension « *Distance/Bearing : Matched Features* » en suivant la procédure décrite à la figure ci-dessous.



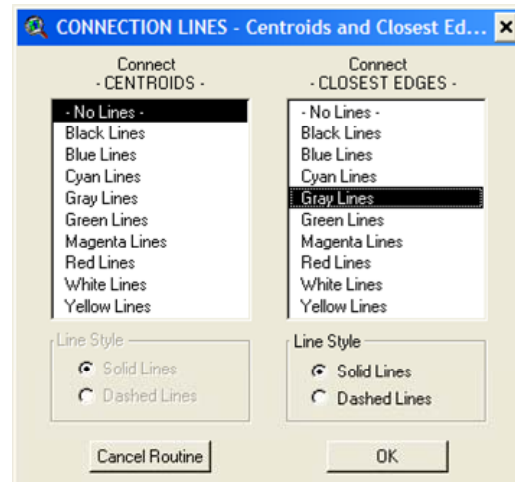
a) Sélectionner un identifiant unique pour les éléments contenus dans le shapefile D10.shp. Puis choisir l'identifiant du micro-bassin (ID_UNIQUE) comme attribut de comparaison avec la couche D85.shp.



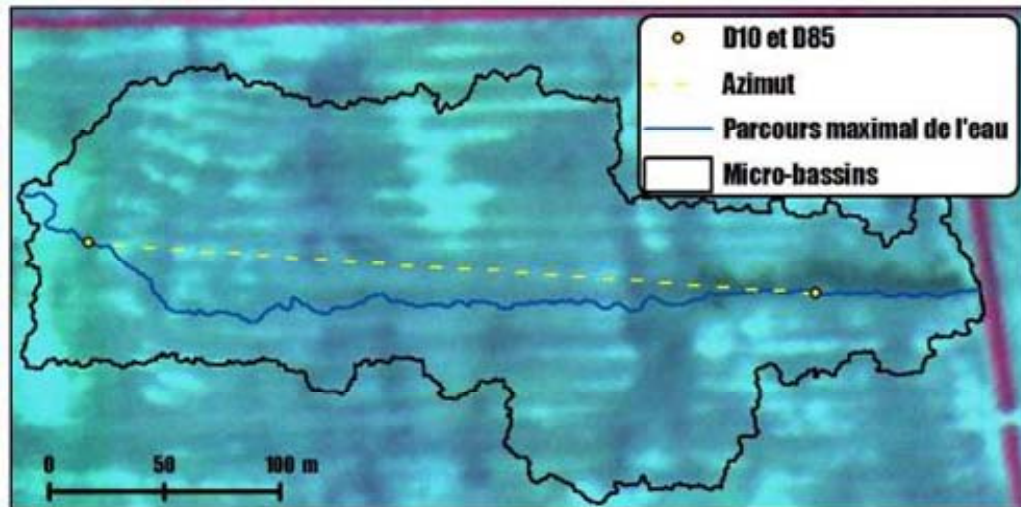
b) Répéter la sélection pour le thème de comparaison (D85.shp).



c) Sélectionner les éléments que vous voulez conserver ou calculer dans la table de résultats. Ici, sélectionnez les « Input Unique ID », « Comparaison Unique ID », « Distance to Closest Edge », « Bearing to Closest Edge » et le format des extraits (shapefile).



d) Enfin, choisissez le type de représentation que vous voulez obtenir : « Connect -Closest Edges » et les caractéristiques des lignes produites (couleur et style).



4. Il est ensuite nécessaire d'ajouter deux champs numériques (entiers) dans la base de données afin d'inclure l'azimut +/- 90° pour dériver les perpendiculaires. S'assurer que les angles ainsi obtenus sont compris entre 0° et 360°. Sinon, rectifier la situation.

Azimut entre les pts D10 et D85							
Shape	Connect	Input_id	Comp_id	Edge_bear	Edge_dist	Azimutplus	Azimutmoins
PolyLine	Closest Edges	79	466	273.9929	315.9400	4	184

5. Afin d'éviter des confusions lors de la jointure spatiale des éléments ultérieurement dérivés, il est nécessaire de créer une zone tampon qui permettra de décaler le périmètre des micro-bassins de 1 mètre vers l'intérieur du polygone. Pour ce faire, l'extension «*Buffer theme Builder Extension (1.1)*» est utilisée, avec un tampon de type *Polygone +/-* et une distance de -1 mètre.

Buffer Theme

Theme to buffer: Bv.shp

☐ Buffer only selected features

Buffer Distance

Select Units: Meters

☒ Enter a distance: -1

☐ Use a distance field

Type of Buffer: Polygon+/-/Polygon-

Output

☐ One buffer for each feature

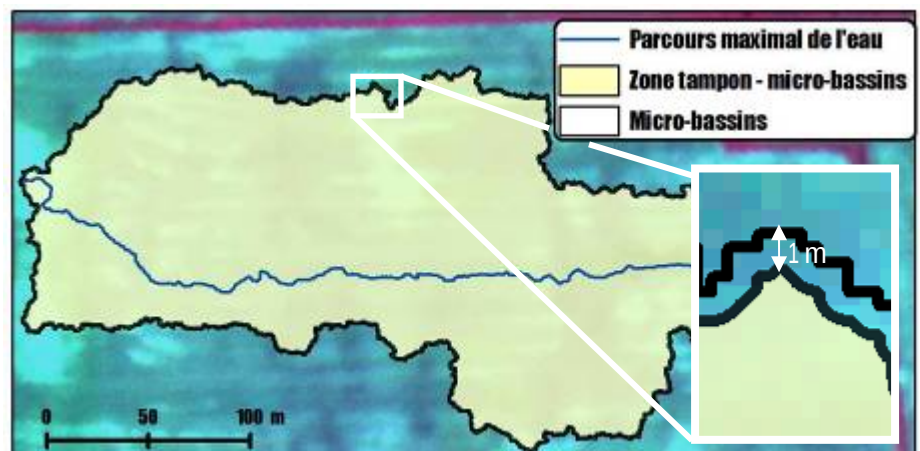
Choose field(s) to put into output:

☐ All Fields

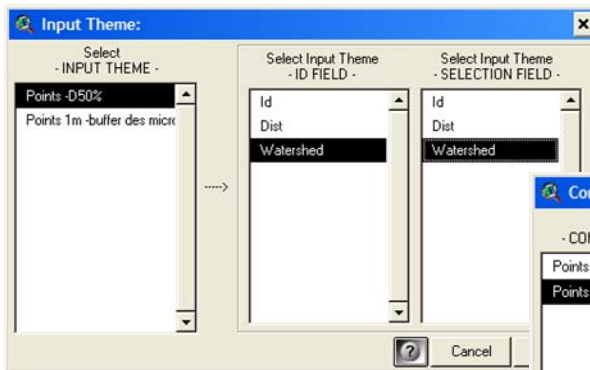
One Field:

☒ Combine all buffers into one shape

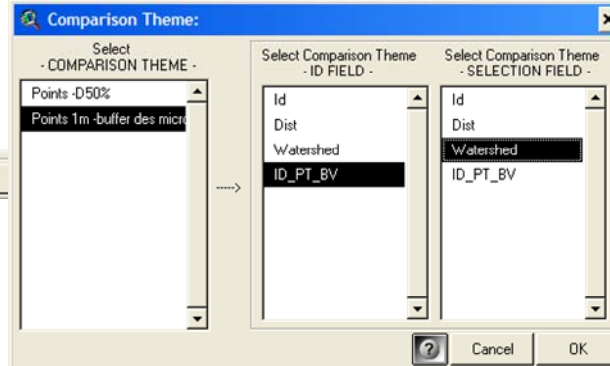
GO! Cancel



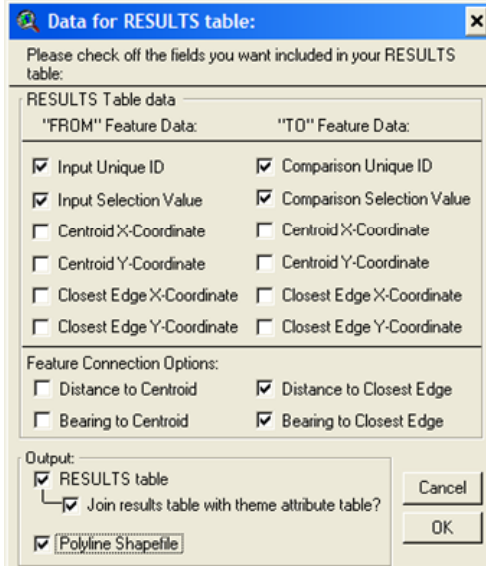
6. Pour évaluer la pente latérale, l'extension *Distance/Bearing : Matched Features* sera encore utilisée. Cette extension permet de réaliser des analyses entre 2 thèmes de points ayant des attributs identiques. Il est donc nécessaire de convertir les polygones des micro-bassins en polygones (avec la fonction « *Convert polygons to polylines* » de l'extension « *Xtools* »).
7. Puis, ajouter des points à tous les mètres le long de ces polygones avec le script « *Divide line by adding points evenly* ». Le fichier résultant sera nommé *Points1m Buffer.shp*
8. Ensuite, il est nécessaire de transférer les attributs des micro-bassins aux points ainsi dérivés.
9. Chaque point de la couche d'information *Points1mBuffer.shp* sera représenté par un identifiant unique. Pour ce faire, créer un champ d'attribut alphanumérique qui sera composé de l'incrément attribué automatiquement aux points de la couche *Points1mBuffer.shp* par la fonction « *Divide line by adding points evenly* » et le numéro de micro-bassin associé (ex : 23626-1; # du micro-bassin - # Point).
10. À l'instar des points D10 et D85 dérivés le long du parcours de l'eau, les points situés à mi-distance des parcours de l'eau seront utilisés afin d'évaluer la pente latérale. Pour ce faire, les sauvegarder dans un shapefile séparé (*D50.shp*) et s'assurer que la base de données renferme l'identifiant des micro-bassins.
11. Utiliser l'extension « *Distance/Bearing : Matched Features* » pour tracer les azimuts entre les points du fichier *D50.shp* et ceux des *Points1mBuffer.shp* avec la procédure présentée ci-dessous.



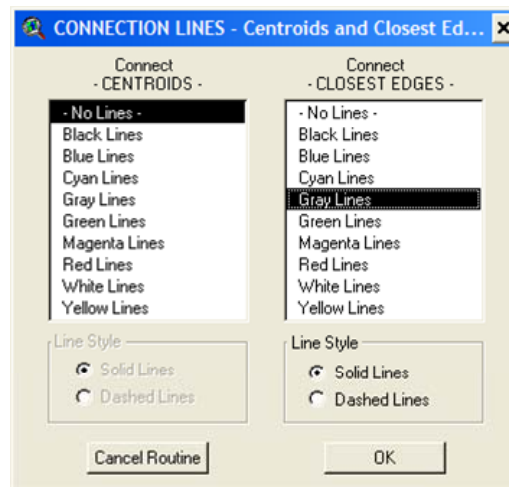
a) Sélectionner un identifiant unique pour les éléments contenus dans les couche des points D50.shp. Puis choisir l'attribut de comparaison avec les points de la couche géographique contenant les points localisés sur le périmètre des micro-bassins. Dans les 2 cas, c'est l'identifiant du micro-bassin qui est utilisé.



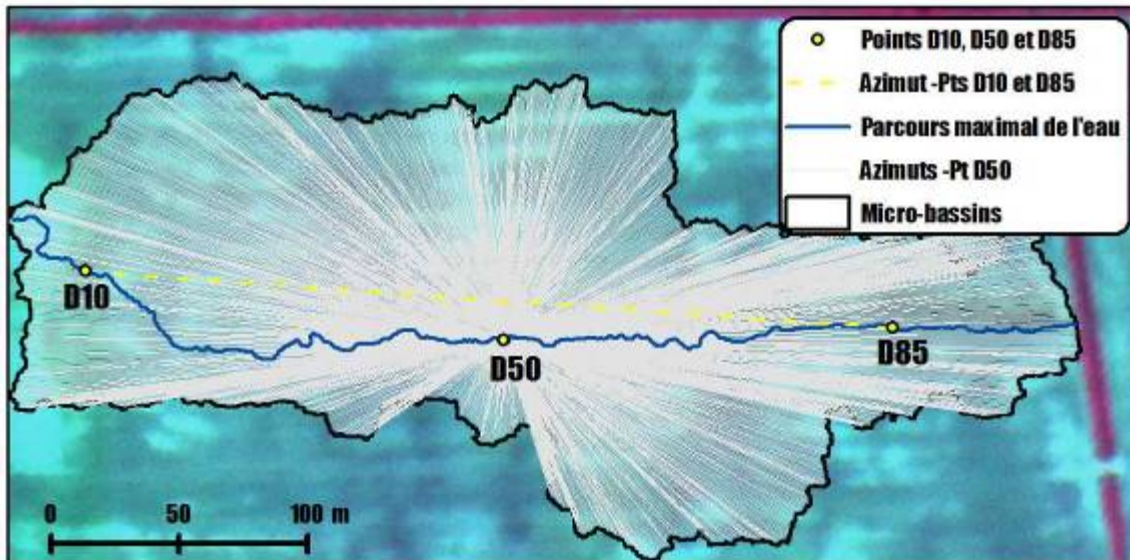
b) Répéter la sélection pour le thème de comparaison (Points localisés sur le périmètre de la zone tampon des micro-bassins).



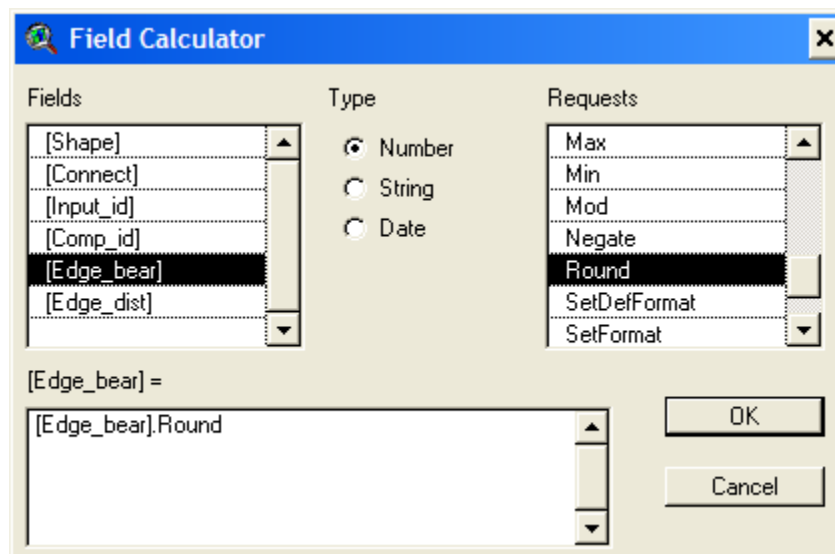
c) Sélectionner les éléments que vous voulez conserver ou calculer dans la table de résultats. Ici, **sélectionnez les « Input » et « Comparaison Selection Value »** pour faire les jointures subséquentes de tables ainsi que le « Distance to Closest Edge », « Bearing to Closest Edge » et le format des extrants (shapefile).



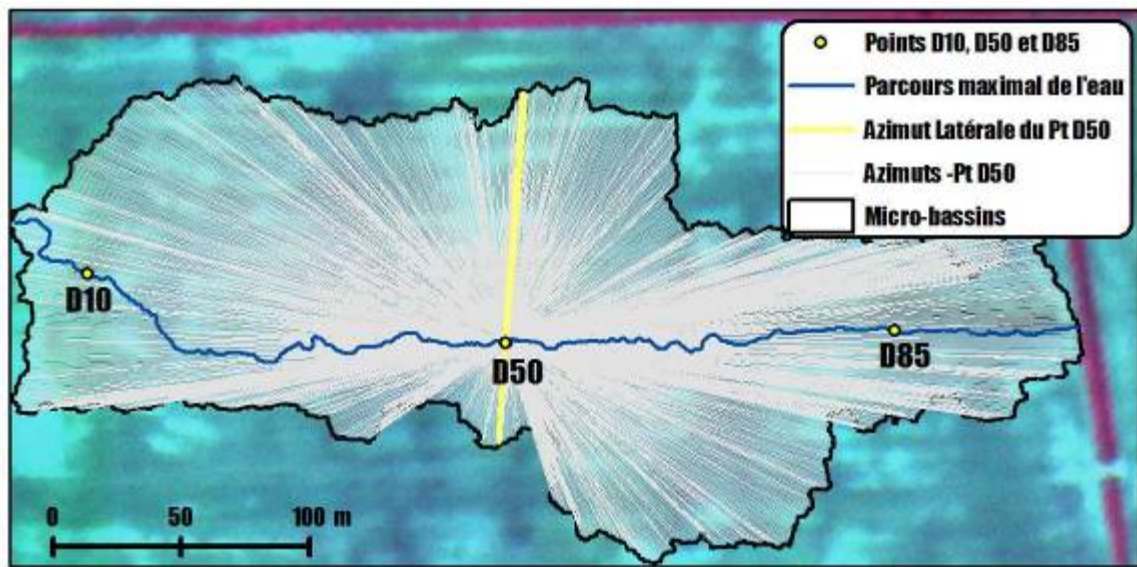
d) Enfin, choisissez le type de représentation que vous voulez obtenir : « Connet -Closest Edges » et les caractéristiques des lignes produites (couleur et style).



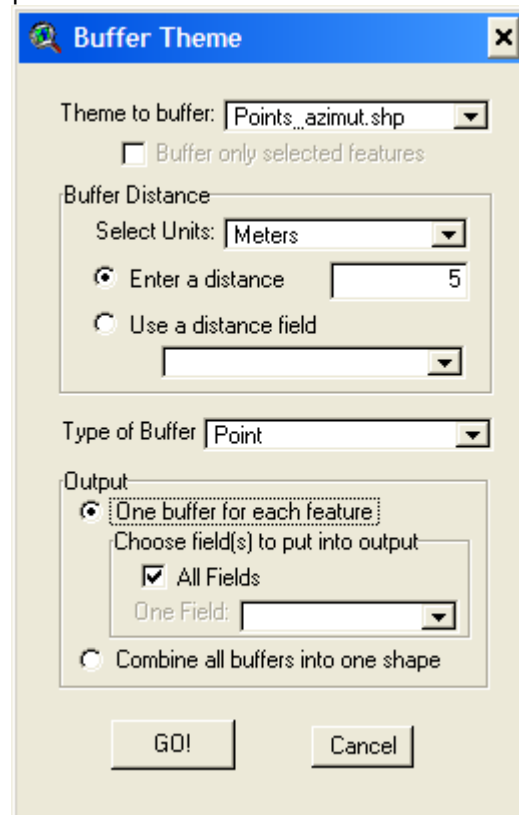
12. Afin de parvenir à associer les tables d'attributs, arrondir les azimuts calculés par l'extension « Distance/Bearing : Matched Features » avec la fonction « Round » du « Field Calculator ».



13. Puis, à l'aide d'une jointure de table, sélectionner dans la couche contenant les lignes d'azimut, celles qui correspondent à l'azimut longitudinal $\pm 90^\circ$. S'assurer que chaque micro-bassin a été caractérisé. Transférer les éléments sélectionnés dans un autre shapefile. Dans les cas où plusieurs éléments ont été sélectionnés pour un même micro-bassin, une pente latérale moyenne sera subséquemment évaluée.



14. Isoler les points de la couche *Points1mBuffer.shp* qui sont situés à l'extrémité des lignes azimuts perpendiculaires au parcours de l'eau. Pour ce faire, joindre la table des attributs du shapefile des *azimuts latéraux des points D50* à la table des *Points1mBuffer.shp* à l'aide de l'identifiant unique (consolidant le # du micro-bassin et le # Point). Transférer les points sélectionnés dans un nouveau shapefile.
15. Comme il a été nécessaire pour l'évaluation de la pente longitudinale, créer une zone tampon de 5 mètres autour des points.



16. Évaluer les statistiques zonales afin d'extraire l'élévation maximum pour chaque point des 2 thèmes concernés à l'aide de l'extension « *Surface Areas From Elevation Grids* ». Sélectionner l'identifiant unique des points pour le *Polygon ID FIELD* (créé à l'étape 9 de cette procédure).

Grid Statistics for Polygons:

Please select - GRID Theme -
Mna

Please select - POLYGON Theme -
Buffer de 5 m - pts

Please select - Polygon ID FIELD -
Id
Dist
Watershed
Id_pt_bv

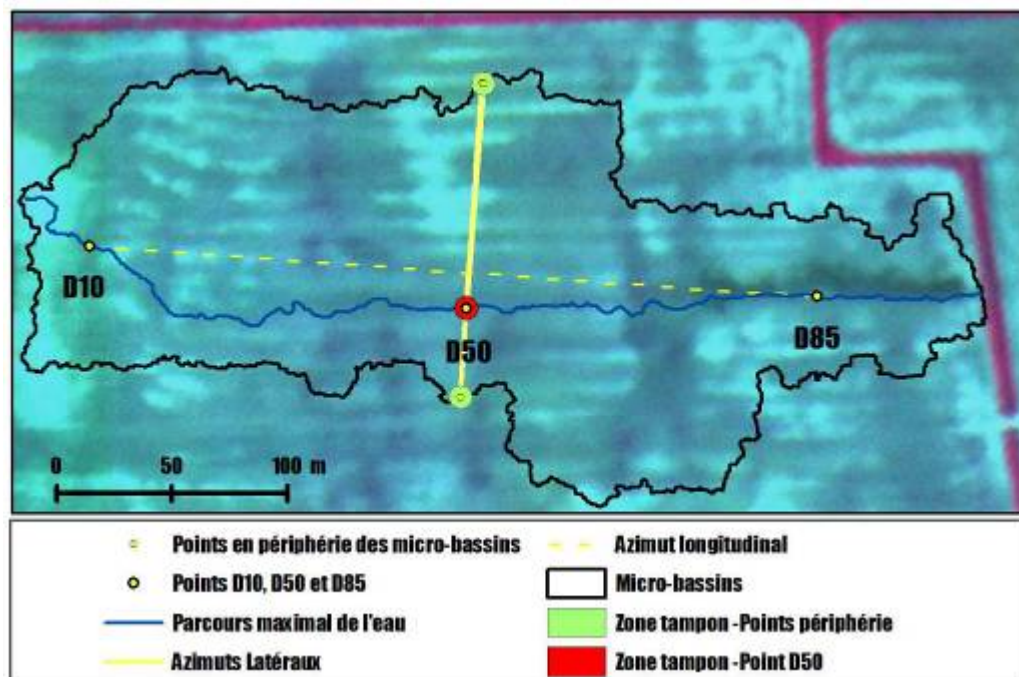
☒ Generate Statistics with basic ZonalStatsTable request (quickest - see 'Help')

☐ Generate Statistics with modified ZonalStatsTable request (see 'Help')

☐ Calculate statistics for polygons with NO DATA values?

Help Cancel OK

17. Cette extension créera une table Dbase. Joindre cette table à la couche contenant les lignes azimuts à l'aide de l'identifiant unique des points (ID_PT_BV). Ajouter un champ numérique à la table des lignes azimuts et y transférer l'élévation moyenne (MEAN) à l'aide d'une jointure de table.
18. Répéter les étapes 16 et 17 pour la couche de points localisés à D50. Utiliser comme identifiant de ces points les incréments de micro-bassins.



19. Les attributs altimétriques des deux couches de points qui sont ainsi dérivés doivent être intégrés dans la table des lignes azimuts à l'aide de jointures des tables (avec l'identifiant du micro-bassin pour la table de la couche des points *D50* et de l'identifiant consolidant le # du

micro-bassin et le # Point pour la couche *azimut latéral des points D50*. La pente est ensuite dérivée à partir de l'équation suivante :

$$Pente = \frac{(Z_{BEAR} - Z_{D50\%})}{(D_{BEAR})} * 100$$

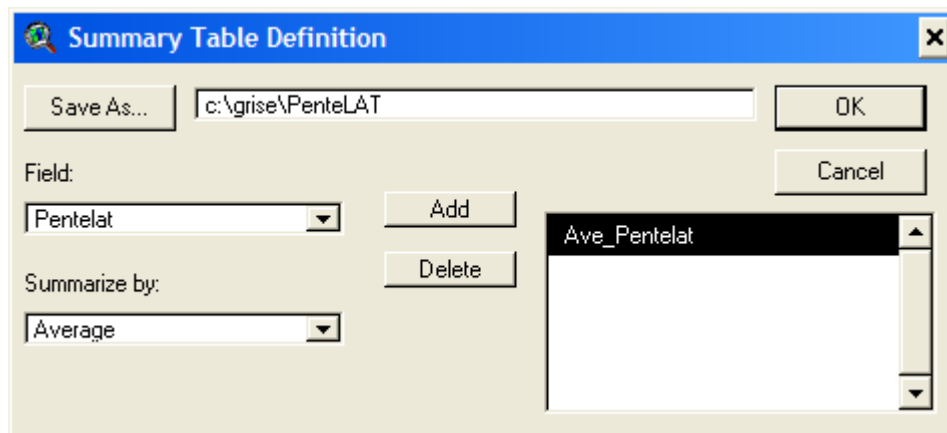
où : **Pente**: Pente latérale du micro-bassin (%)

D_{BEAR} : Distances évaluées à entre le point localisé à la moitié de la longueur du parcours maximal de l'eau du micro-bassin et le point situé en périphérie du micro-bassin

Z_{D50%} : Élévation maximale de la zone tampon circulaire de 5 mètres des points localisés à la moitié de la longueur du parcours de l'eau maximal du micro-bassin

Z_{BEAR} : Élévation maximale de la zone tampon circulaire de 5 mètres des points localisés en périphérie des micro-bassins (à un angle perpendiculaire au parcours de l'eau).

20. Comptabiliser la moyenne des pentes latérales par micro-bassin à l'aide de la fonction Field/Summarize en prenant soin de sélectionner le champ *Input_ID* qui devrait contenir l'identifiant des micro-bassins.



21. Cette fonction produira une table DBF contenant la pente latérale moyenne des micro-bassins. Transférer cet attribut à la couche de micro-bassin.

ANNEXE B : Résultats détaillés de l'analyse de variance des propriétés des champs expérimentaux selon les classes de formes de relief

ANOVA pour la variable Argile, champ 1 **Procédure MIXED de SAS, tableaux des effets fixes**

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	4	33	9,93	<,0001

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	33,7000	2,2020	33	15,30	<,0001	0,05	29,2200	38,1800
CLasse LandMapR	2	30,3636	2,0995	33	14,46	<,0001	0,05	26,0922	34,6351
CLasse LandMapR	3	40,4286	1,8610	33	21,72	<,0001	0,05	36,6423	44,2148
CLasse LandMapR	4	15,0000	4,9238	33	3,05	0,0045	0,05	4,9825	25,0175
CLasse LandMapR	5	12,0000	6,9633	33	1,72	0,0942	0,05	-2,1669	26,1669

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	3,3364	3,0425	33	1,10	0,2808	0,05	-2,8536	9,5263
CLasse LandMapR	1	3	-6,7286	2,8831	33	-2,33	0,0258	0,05	-12,5942	-0,8629
CLasse LandMapR	1	4	18,7000	5,3937	33	3,47	0,0015	0,05	7,7264	29,6736
CLasse LandMapR	1	5	21,7000	7,3031	33	2,97	0,0055	0,05	6,8417	36,5583
CLasse LandMapR	2	3	-10,0649	2,8056	33	-3,59	0,0011	0,05	-15,7729	-4,3569
CLasse LandMapR	2	4	15,3636	5,3527	33	2,87	0,0071	0,05	4,4735	26,2538
CLasse LandMapR	2	5	18,3636	7,2729	33	2,52	0,0166	0,05	3,5668	33,1605
CLasse LandMapR	3	4	25,4286	5,2637	33	4,83	<,0001	0,05	14,7194	36,1377
CLasse LandMapR	3	5	28,4286	7,2077	33	3,94	0,0004	0,05	13,7645	43,0927
CLasse LandMapR	4	5	3,0000	8,5282	33	0,35	0,7272	0,05	-14,3508	20,3508

ANOVA pour la variable Élévation, champ 1

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
LANDMAPR20	4	33	18.71	<,0001

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	38,6630	0,2769	33	139,64	<,0001	0,05	38,0997	39,2263
CLasse LandMapR	2	36,6682	0,2640	33	138,89	<,0001	0,05	36,1311	37,2053
CLasse LandMapR	3	37,5650	0,2340	33	160,53	<,0001	0,05	37,0889	38,0411
CLasse LandMapR	4	34,0400	0,6191	33	54,98	<,0001	0,05	32,7804	35,2996
CLasse LandMapR	5	33,8100	0,8756	33	38,61	<,0001	0,05	32,0286	35,5914

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	1,9948	0,3826	33	5,21	<,0001	0,05	1,2165	2,7732
CLasse LandMapR	1	3	1,0980	0,3625	33	3,03	0,0047	0,05	0,3604	1,8356
CLasse LandMapR	1	4	4,6230	0,6782	33	6,82	<,0001	0,05	3,2431	6,0029
CLasse LandMapR	1	5	4,8530	0,9183	33	5,28	<,0001	0,05	2,9847	6,7213
CLasse LandMapR	2	3	-0,8968	0,3528	33	-2,54	0,0159	0,05	-1,6146	-0,1791
CLasse LandMapR	2	4	2,6282	0,6731	33	3,90	0,0004	0,05	1,2588	3,9976
CLasse LandMapR	2	5	2,8582	0,9145	33	3,13	0,0037	0,05	0,9976	4,7188
CLasse LandMapR	3	4	3,5250	0,6619	33	5,33	<,0001	0,05	2,1784	4,8716
CLasse LandMapR	3	5	3,7550	0,9063	33	4,14	0,0002	0,05	1,9111	5,5989
CLasse LandMapR	4	5	0,2300	1,0724	33	0,21	0,8315	0,05	-1,9518	2,4118

ANOVA pour la variable % Matière organique, champ 1

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	4	33	1,99	0,1182

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	3,7490	0,2618	33	14,32	<,0001	0,05	3,2164	4,2816
CLasse LandMapR	2	3,6200	0,2496	33	14,50	<,0001	0,05	3,1121	4,1279
CLasse LandMapR	3	4,2614	0,2213	33	19,26	<,0001	0,05	3,8113	4,7116

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	4	2,8900	0,5854	33	4,94	<,0001	0,05	1,6990	4,0810
CLasse LandMapR	5	3,0900	0,8279	33	3,73	0,0007	0,05	1,4056	4,7744

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	0,1290	0,3617	33	0,36	0,7236	0,05	-0,6069	0,8649
CLasse LandMapR	1	3	-0,5124	0,3428	33	-1,49	0,1444	0,05	-1,2098	0,1850
CLasse LandMapR	1	4	0,8590	0,6413	33	1,34	0,1896	0,05	-0,4457	2,1637
CLasse LandMapR	1	5	0,6590	0,8683	33	0,76	0,4533	0,05	-1,1076	2,4256
CLasse LandMapR	2	3	-0,6414	0,3336	33	-1,92	0,0632	0,05	-1,3201	0,03722
CLasse LandMapR	2	4	0,7300	0,6364	33	1,15	0,2596	0,05	-0,5648	2,0248
CLasse LandMapR	2	5	0,5300	0,8647	33	0,61	0,5441	0,05	-1,2293	2,2893
CLasse LandMapR	3	4	1,3714	0,6258	33	2,19	0,0356	0,05	0,09818	2,6447
CLasse LandMapR	3	5	1,1714	0,8569	33	1,37	0,1809	0,05	-0,5720	2,9149
CLasse LandMapR	4	5	-0,2000	1,0140	33	-0,20	0,8448	0,05	-2,2629	1,8629

ANOVA pour la variable Pente, champ 1

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	4	33	27,27	<,0001

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	0,8760	0,2163	33	4,05	0,0003	0,05	0,4359	1,3161
CLasse LandMapR	2	1,8464	0,2062	33	8,95	<,0001	0,05	1,4268	2,2659
CLasse LandMapR	3	0,8429	0,1828	33	4,61	<,0001	0,05	0,4709	1,2148
CLasse LandMapR	4	1,7000	0,4837	33	3,51	0,0013	0,05	0,7160	2,6840
CLasse LandMapR	5	7,8500	0,6840	33	11,48	<,0001	0,05	6,4584	9,2416

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	-0,9704	0,2989	33	-3,25	0,0027	0,05	-1,5784	-0,3623
CLasse LandMapR	1	3	0,03314	0,2832	33	0,12	0,9075	0,05	-0,5430	0,6093
CLasse LandMapR	1	4	-0,8240	0,5298	33	-1,56	0,1294	0,05	-1,9019	0,2539
CLasse LandMapR	1	5	-6,9740	0,7174	33	-9,72	<,0001	0,05	-8,4335	-5,5145
CLasse LandMapR	2	3	1,0035	0,2756	33	3,64	0,0009	0,05	0,4428	1,5642
CLasse LandMapR	2	4	0,1464	0,5258	33	0,28	0,7825	0,05	-0,9234	1,2161

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	2	5	-6,0036	0,7144	33	-8,40	<,0001	0,05	-7,4571	-4,5502
CLasse LandMapR	3	4	-0,8571	0,5170	33	-1,66	0,1068	0,05	-1,9091	0,1948
CLasse LandMapR	3	5	-7,0071	0,7080	33	-9,90	<,0001	0,05	-8,4476	-5,5667
CLasse LandMapR	4	5	-6,1500	0,8377	33	-7,34	<,0001	0,05	-7,8543	-4,4457

ANOVA pour la variable pH, champ 1

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	4	33	4,13	0,0080

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	6,2960	0,1101	33	57,19	<,0001	0,05	6,0720	6,5200
CLasse LandMapR	2	6,7809	0,1050	33	64,60	<,0001	0,05	6,5673	6,9945
CLasse LandMapR	3	6,3707	0,09304	33	68,47	<,0001	0,05	6,1814	6,5600
CLasse LandMapR	4	6,9750	0,2462	33	28,33	<,0001	0,05	6,4742	7,4758
CLasse LandMapR	5	6,6900	0,3481	33	19,22	<,0001	0,05	5,9817	7,3983

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	-0,4849	0,1521	33	-3,19	0,0031	0,05	-0,7944	-0,1754
CLasse LandMapR	1	3	-0,07471	0,1441	33	-0,52	0,6077	0,05	-0,3680	0,2185
CLasse LandMapR	1	4	-0,6790	0,2697	33	-2,52	0,0168	0,05	-1,2276	-0,1304
CLasse LandMapR	1	5	-0,3940	0,3651	33	-1,08	0,2884	0,05	-1,1369	0,3489
CLasse LandMapR	2	3	0,4102	0,1403	33	2,92	0,0062	0,05	0,1248	0,6956
CLasse LandMapR	2	4	-0,1941	0,2676	33	-0,73	0,4734	0,05	-0,7386	0,3504
CLasse LandMapR	2	5	0,09091	0,3636	33	0,25	0,8041	0,05	-0,6489	0,8307
CLasse LandMapR	3	4	-0,6043	0,2632	33	-2,30	0,0282	0,05	-1,1397	-0,06886
LANDMAPR20	3	5	-0,3193	0,3604	33	-0,89	0,3820	0,05	-1,0524	0,4139
LANDMAPR20	4	5	0,2850	0,4264	33	0,67	0,5085	0,05	-0,5825	1,1525

ANOVA pour la variable % d'argile, champ 2

Procédure MIXED de SAS

Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	4	37	23,95	<,0001

Least Squares Means									
Effect	LANDMAPR20	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	14,8333	2,3009	37	6,45	<,0001	0,05	10,1713	19,4954
CLasse LandMapR	2	12,6250	1,9926	37	6,34	<,0001	0,05	8,5876	16,6624
CLasse LandMapR	3	17,8889	1,3284	37	13,47	<,0001	0,05	15,1973	20,5805
CLasse LandMapR	4	20,0000	2,5205	37	7,93	<,0001	0,05	14,8930	25,1070
CLasse LandMapR	5	41,8000	2,5205	37	16,58	<,0001	0,05	36,6930	46,9070

Differences of Least Squares Means								
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha
CLasse LandMapR	1	2	2,2083	3,0438	37	0,73	0,4727	0,05
CLasse LandMapR	1	3	-3,0556	2,6568	37	-1,15	0,2575	0,05
CLasse LandMapR	1	4	-5,1667	3,4128	37	-1,51	0,1385	0,05
CLasse LandMapR	1	5	-26,9667	3,4128	37	-7,90	<,0001	0,05
CLasse LandMapR	2	3	-5,2639	2,3948	37	-2,20	0,0343	0,05
CLasse LandMapR	2	4	-7,3750	3,2130	37	-2,30	0,0275	0,05
CLasse LandMapR	2	5	-29,1750	3,2130	37	-9,08	<,0001	0,05
CLasse LandMapR	3	4	-2,1111	2,8491	37	-0,74	0,4634	0,05
CLasse LandMapR	3	5	-23,9111	2,8491	37	-8,39	<,0001	0,05
CLasse LandMapR	4	5	-21,8000	3,5645	37	-6,12	<,0001	0,05

ANOVA pour la variable Élévation, champ 2

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	4	37	20,54	<,0001

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	51,3150	0,2667	37	192,43	<,0001	0,05	50,7747	51,8553
CLasse LandMapR	2	49,5163	0,2309	37	214,41	<,0001	0,05	49,0483	49,9842
CLasse LandMapR	3	50,7450	0,1540	37	329,60	<,0001	0,05	50,4331	51,0569
CLasse LandMapR	4	48,3600	0,2921	37	165,55	<,0001	0,05	47,7681	48,9519
CLasse LandMapR	5	49,6340	0,2921	37	169,91	<,0001	0,05	49,0421	50,2259

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	1,7988	0,3528	37	5,10	<,0001	0,05	1,0840	2,5135
CLasse LandMapR	1	3	0,5700	0,3079	37	1,85	0,0721	0,05	-0,05390	1,1939
CLasse LandMapR	1	4	2,9550	0,3955	37	7,47	<,0001	0,05	2,1536	3,7564
CLasse LandMapR	1	5	1,6810	0,3955	37	4,25	0,0001	0,05	0,8796	2,4824
CLasse LandMapR	2	3	-1,2287	0,2776	37	-4,43	<,0001	0,05	-1,7911	-0,6664
CLasse LandMapR	2	4	1,1562	0,3724	37	3,11	0,0036	0,05	0,4017	1,9108
CLasse LandMapR	2	5	-0,1178	0,3724	37	-0,32	0,7536	0,05	-0,8723	0,6368
CLasse LandMapR	3	4	2,3850	0,3302	37	7,22	<,0001	0,05	1,7159	3,0541
CLasse LandMapR	3	5	1,1110	0,3302	37	3,36	0,0018	0,05	0,4419	1,7801
CLasse LandMapR	4	5	-1,2740	0,4131	37	-3,08	0,0039	0,05	-2,1110	-0,4370

ANOVA pour la variable % Matière organique, champ 2

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	4	37	4,61	0,0040

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	4,8933	0,3882	37	12,61	<,0001	0,05	4,1069	5,6798
CLasse LandMapR	2	2,8663	0,3361	37	8,53	<,0001	0,05	2,1851	3,5474
CLasse LandMapR	3	3,5944	0,2241	37	16,04	<,0001	0,05	3,1404	4,0485

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	4	2,9120	0,4252	37	6,85	<,0001	0,05	2,0505	3,7735
CLasse LandMapR	5	3,4860	0,4252	37	8,20	<,0001	0,05	2,6245	4,3475

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	2,0271	0,5135	37	3,95	0,0003	0,05	0,9867	3,0675
CLasse LandMapR	1	3	1,2989	0,4482	37	2,90	0,0063	0,05	0,3908	2,2070
CLasse LandMapR	1	4	1,9813	0,5757	37	3,44	0,0015	0,05	0,8148	3,1479
CLasse LandMapR	1	5	1,4073	0,5757	37	2,44	0,0194	0,05	0,2408	2,5739
CLasse LandMapR	2	3	-0,7282	0,4040	37	-1,80	0,0796	0,05	-1,5468	0,09039
CLasse LandMapR	2	4	-0,04575	0,5420	37	-0,08	0,9332	0,05	-1,1440	1,0525
CLasse LandMapR	2	5	-0,6197	0,5420	37	-1,14	0,2602	0,05	-1,7180	0,4785
CLasse LandMapR	3	4	0,6824	0,4806	37	1,42	0,1640	0,05	-0,2914	1,6563
CLasse LandMapR	3	5	0,1084	0,4806	37	0,23	0,8227	0,05	-0,8654	1,0823
CLasse LandMapR	4	5	-0,5740	0,6013	37	-0,95	0,3460	0,05	-1,7924	0,6444

ANOVA pour la variable Pente, champ 2

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	4	37	2,08	0,1027

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	1,0650	0,1124	37	9,47	<,0001	0,05	0,8372	1,2928
CLasse LandMapR	2	1,2925	0,09735	37	13,28	<,0001	0,05	1,0953	1,4897
CLasse LandMapR	3	1,2561	0,06490	37	19,36	<,0001	0,05	1,1246	1,3876
CLasse LandMapR	4	1,0200	0,1231	37	8,28	<,0001	0,05	0,7705	1,2695
CLasse LandMapR	5	0,9700	0,1231	37	7,88	<,0001	0,05	0,7205	1,2195

Differences of Least Squares Means								
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha
CLasse LandMapR	1	2	-0,2275	0,1487	37	-1,53	0,1345	0,05
CLasse LandMapR	1	3	-0,1911	0,1298	37	-1,47	0,1494	0,05
CLasse LandMapR	1	4	0,04500	0,1667	37	0,27	0,7887	0,05
CLasse LandMapR	1	5	0,09500	0,1667	37	0,57	0,5723	0,05
CLasse LandMapR	2	3	0,03639	0,1170	37	0,31	0,7575	0,05
CLasse LandMapR	2	4	0,2725	0,1570	37	1,74	0,0909	0,05

Differences of Least Squares Means								
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha
CLasse LandMapR	2	5	0,3225	0,1570	37	2,05	0,0470	0,05
CLasse LandMapR	3	4	0,2361	0,1392	37	1,70	0,0982	0,05
CLasse LandMapR	3	5	0,2861	0,1392	37	2,06	0,0469	0,05
CLasse LandMapR	4	5	0,05000	0,1741	37	0,29	0,7756	0,05

ANOVA pour la variable pH, champ 2

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	4	37	3,36	0,0191

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	5,4217	0,2657	37	20,41	<,0001	0,05	4,8834	5,9600
CLasse LandMapR	2	5,6963	0,2301	37	24,76	<,0001	0,05	5,2301	6,1624
CLasse LandMapR	3	5,9478	0,1534	37	38,78	<,0001	0,05	5,6370	6,2586
CLasse LandMapR	4	6,0680	0,2910	37	20,85	<,0001	0,05	5,4783	6,6577
CLasse LandMapR	5	6,7800	0,2910	37	23,30	<,0001	0,05	6,1903	7,3697

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	-0,2746	0,3514	37	-0,78	0,4396	0,05	-0,9867	0,4375
CLasse LandMapR	1	3	-0,5261	0,3068	37	-1,72	0,0947	0,05	-1,1477	0,09546
CLasse LandMapR	1	4	-0,6463	0,3941	37	-1,64	0,1094	0,05	-1,4448	0,1521
CLasse LandMapR	1	5	-1,3583	0,3941	37	-3,45	0,0014	0,05	-2,1568	-0,5599
CLasse LandMapR	2	3	-0,2515	0,2765	37	-0,91	0,3689	0,05	-0,8118	0,3088
CLasse LandMapR	2	4	-0,3718	0,3710	37	-1,00	0,3228	0,05	-1,1234	0,3799
CLasse LandMapR	2	5	-1,0837	0,3710	37	-2,92	0,0059	0,05	-1,8354	-0,3321
CLasse LandMapR	3	4	-0,1202	0,3290	37	-0,37	0,7169	0,05	-0,7868	0,5463
CLasse LandMapR	3	5	-0,8322	0,3290	37	-2,53	0,0158	0,05	-1,4988	-0,1657
CLasse LandMapR	4	5	-0,7120	0,4116	37	-1,73	0,0920	0,05	-1,5459	0,1219

ANOVA pour la variable % d'argile, champ 3

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	6	24	2,43	0,0560

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	26,5000	2,2710	24	11,67	<,0001	0,05	21,8130	31,1870
CLasse LandMapR	2	21,5000	2,2710	24	9,47	<,0001	0,05	16,8130	26,1870
CLasse LandMapR	3	26,6429	0,8583	24	31,04	<,0001	0,05	24,8713	28,4144
CLasse LandMapR	4	24,5000	2,2710	24	10,79	<,0001	0,05	19,8130	29,1870
CLasse LandMapR	5	28,0000	1,6058	24	17,44	<,0001	0,05	24,6858	31,3142
CLasse LandMapR	6	25,1667	1,3111	24	19,19	<,0001	0,05	22,4606	27,8727
CLasse LandMapR	7	17,0000	3,2116	24	5,29	<,0001	0,05	10,3715	23,6285

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	5,0000	3,2116	24	1,56	0,1326	0,05	-1,6285	11,6285
CLasse LandMapR	1	3	-0,1429	2,4278	24	-0,06	0,9536	0,05	-5,1535	4,8678
CLasse LandMapR	1	4	2,0000	3,2116	24	0,62	0,5393	0,05	-4,6285	8,6285
CLasse LandMapR	1	5	-1,5000	2,7813	24	-0,54	0,5946	0,05	-7,2404	4,2404
CLasse LandMapR	1	6	1,3333	2,6223	24	0,51	0,6158	0,05	-4,0788	6,7454
CLasse LandMapR	1	7	9,5000	3,9334	24	2,42	0,0237	0,05	1,3818	17,6182
CLasse LandMapR	2	3	-5,1429	2,4278	24	-2,12	0,0447	0,05	-10,1535	-0,1322
CLasse LandMapR	2	4	-3,0000	3,2116	24	-0,93	0,3596	0,05	-9,6285	3,6285
CLasse LandMapR	2	5	-6,5000	2,7813	24	-2,34	0,0281	0,05	-12,2404	-0,7596
CLasse LandMapR	2	6	-3,6667	2,6223	24	-1,40	0,1748	0,05	-9,0788	1,7454
CLasse LandMapR	2	7	4,5000	3,9334	24	1,14	0,2639	0,05	-3,6182	12,6182
CLasse LandMapR	3	4	2,1429	2,4278	24	0,88	0,3862	0,05	-2,8678	7,1535
CLasse LandMapR	3	5	-1,3571	1,8208	24	-0,75	0,4633	0,05	-5,1151	2,4008
CLasse LandMapR	3	6	1,4762	1,5671	24	0,94	0,3556	0,05	-1,7582	4,7105
CLasse LandMapR	3	7	9,6429	3,3243	24	2,90	0,0078	0,05	2,7818	16,5040
CLasse LandMapR	4	5	-3,5000	2,7813	24	-1,26	0,2204	0,05	-9,2404	2,2404
CLasse LandMapR	4	6	-0,6667	2,6223	24	-0,25	0,8015	0,05	-6,0788	4,7454
CLasse LandMapR	4	7	7,5000	3,9334	24	1,91	0,0686	0,05	-0,6182	15,6182
CLasse LandMapR	5	6	2,8333	2,0731	24	1,37	0,1844	0,05	-1,4453	7,1120
CLasse LandMapR	5	7	11,0000	3,5907	24	3,06	0,0053	0,05	3,5892	18,4108
CLasse LandMapR	6	7	8,1667	3,4689	24	2,35	0,0271	0,05	1,0071	15,3262

ANOVA pour la variable Élévation, champ 3

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	6	24	19,07	<,0001

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	88,4800	0,9550	24	92,65	<,0001	0,05	86,5090	90,4510
CLasse LandMapR	2	89,6400	0,9550	24	93,87	<,0001	0,05	87,6690	91,6110
CLasse LandMapR	3	84,9271	0,3610	24	235,29	<,0001	0,05	84,1822	85,6721
CLasse LandMapR	4	86,3000	0,9550	24	90,37	<,0001	0,05	84,3290	88,2710
CLasse LandMapR	5	85,4775	0,6753	24	126,58	<,0001	0,05	84,0838	86,8712
CLasse LandMapR	6	80,6400	0,5514	24	146,26	<,0001	0,05	79,5020	81,7780
CLasse LandMapR	7	79,7700	1,3506	24	59,06	<,0001	0,05	76,9826	82,5574

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	-1,1600	1,3506	24	-0,86	0,3989	0,05	-3,9474	1,6274
CLasse LandMapR	1	3	3,5529	1,0209	24	3,48	0,0019	0,05	1,4458	5,6599
CLasse LandMapR	1	4	2,1800	1,3506	24	1,61	0,1196	0,05	-0,6074	4,9674
CLasse LandMapR	1	5	3,0025	1,1696	24	2,57	0,0169	0,05	0,5885	5,4165
CLasse LandMapR	1	6	7,8400	1,1027	24	7,11	<,0001	0,05	5,5641	10,1159
CLasse LandMapR	1	7	8,7100	1,6541	24	5,27	<,0001	0,05	5,2961	12,1239
CLasse LandMapR	2	3	4,7129	1,0209	24	4,62	0,0001	0,05	2,6058	6,8199
CLasse LandMapR	2	4	3,3400	1,3506	24	2,47	0,0209	0,05	0,5526	6,1274
CLasse LandMapR	2	5	4,1625	1,1696	24	3,56	0,0016	0,05	1,7485	6,5765
CLasse LandMapR	2	6	9,0000	1,1027	24	8,16	<,0001	0,05	6,7241	11,2759
CLasse LandMapR	2	7	9,8700	1,6541	24	5,97	<,0001	0,05	6,4561	13,2839
CLasse LandMapR	3	4	-1,3729	1,0209	24	-1,34	0,1913	0,05	-3,4799	0,7342
CLasse LandMapR	3	5	-0,5504	0,7657	24	-0,72	0,4792	0,05	-2,1307	1,0300
CLasse LandMapR	3	6	4,2871	0,6590	24	6,51	<,0001	0,05	2,9270	5,6473
CLasse LandMapR	3	7	5,1571	1,3980	24	3,69	0,0012	0,05	2,2719	8,0424
CLasse LandMapR	4	5	0,8225	1,1696	24	0,70	0,4887	0,05	-1,5915	3,2365
CLasse LandMapR	4	6	5,6600	1,1027	24	5,13	<,0001	0,05	3,3841	7,9359
CLasse LandMapR	4	7	6,5300	1,6541	24	3,95	0,0006	0,05	3,1161	9,9439
CLasse LandMapR	5	6	4,8375	0,8718	24	5,55	<,0001	0,05	3,0382	6,6368
CLasse LandMapR	5	7	5,7075	1,5100	24	3,78	0,0009	0,05	2,5911	8,8239
CLasse LandMapR	6	7	0,8700	1,4588	24	0,60	0,5565	0,05	-2,1407	3,8807

ANOVA pour la variable % Matière organique, champ 3

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	6	24	2,39	0,0595

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	5,7200	1,0506	24	5,44	<,0001	0,05	3,5516	7,8884
CLasse LandMapR	2	8,7250	1,0506	24	8,30	<,0001	0,05	6,5566	10,8934
CLasse LandMapR	3	5,3679	0,3971	24	13,52	<,0001	0,05	4,5483	6,1874
CLasse LandMapR	4	4,2850	1,0506	24	4,08	0,0004	0,05	2,1166	6,4534
CLasse LandMapR	5	4,8000	0,7429	24	6,46	<,0001	0,05	3,2667	6,3333
CLasse LandMapR	6	4,8800	0,6066	24	8,04	<,0001	0,05	3,6281	6,1319
CLasse LandMapR	7	3,3900	1,4858	24	2,28	0,0317	0,05	0,3234	6,4566

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	-3,0050	1,4858	24	-2,02	0,0544	0,05	-6,0716	0,06162
CLasse LandMapR	1	3	0,3521	1,1232	24	0,31	0,7566	0,05	-1,9660	2,6703
CLasse LandMapR	1	4	1,4350	1,4858	24	0,97	0,3438	0,05	-1,6316	4,5016
CLasse LandMapR	1	5	0,9200	1,2868	24	0,71	0,4815	0,05	-1,7358	3,5758
CLasse LandMapR	1	6	0,8400	1,2132	24	0,69	0,4953	0,05	-1,6639	3,3439
CLasse LandMapR	1	7	2,3300	1,8198	24	1,28	0,2126	0,05	-1,4258	6,0858
CLasse LandMapR	2	3	3,3571	1,1232	24	2,99	0,0064	0,05	1,0390	5,6753
CLasse LandMapR	2	4	4,4400	1,4858	24	2,99	0,0064	0,05	1,3734	7,5066
CLasse LandMapR	2	5	3,9250	1,2868	24	3,05	0,0055	0,05	1,2692	6,5808
CLasse LandMapR	2	6	3,8450	1,2132	24	3,17	0,0041	0,05	1,3411	6,3489
CLasse LandMapR	2	7	5,3350	1,8198	24	2,93	0,0073	0,05	1,5792	9,0908
CLasse LandMapR	3	4	1,0829	1,1232	24	0,96	0,3446	0,05	-1,2353	3,4010
CLasse LandMapR	3	5	0,5679	0,8424	24	0,67	0,5067	0,05	-1,1708	2,3065
CLasse LandMapR	3	6	0,4879	0,7250	24	0,67	0,5074	0,05	-1,0085	1,9842
CLasse LandMapR	3	7	1,9779	1,5380	24	1,29	0,2107	0,05	-1,1964	5,1521
CLasse LandMapR	4	5	-0,5150	1,2868	24	-0,40	0,6925	0,05	-3,1708	2,1408
CLasse LandMapR	4	6	-0,5950	1,2132	24	-0,49	0,6283	0,05	-3,0989	1,9089
CLasse LandMapR	4	7	0,8950	1,8198	24	0,49	0,6273	0,05	-2,8608	4,6508
CLasse LandMapR	5	6	-0,08000	0,9591	24	-0,08	0,9342	0,05	-2,0595	1,8995
CLasse LandMapR	5	7	1,4100	1,6612	24	0,85	0,4044	0,05	-2,0186	4,8386
CLasse LandMapR	6	7	1,4900	1,6049	24	0,93	0,3624	0,05	-1,8223	4,8023

ANOVA pour la variable Pente, champ 3

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	6	24	4,67	0,0028

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	1,3400	0,4780	24	2,80	0,0099	0,05	0,3534	2,3266
CLasse LandMapR	2	3,9200	0,4780	24	8,20	<,0001	0,05	2,9334	4,9066
CLasse LandMapR	3	1,9286	0,1807	24	10,67	<,0001	0,05	1,5557	2,3015
CLasse LandMapR	4	1,9200	0,4780	24	4,02	0,0005	0,05	0,9334	2,9066
CLasse LandMapR	5	1,2400	0,3380	24	3,67	0,0012	0,05	0,5423	1,9377
CLasse LandMapR	6	1,2467	0,2760	24	4,52	0,0001	0,05	0,6770	1,8163
CLasse LandMapR	7	1,9900	0,6761	24	2,94	0,0071	0,05	0,5947	3,3853

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	_CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	-2,5800	0,6761	24	-3,82	0,0008	0,05	-3,9753	-1,1847
CLasse LandMapR	1	3	-0,5886	0,5111	24	-1,15	0,2608	0,05	-1,6433	0,4662
CLasse LandMapR	1	4	-0,5800	0,6761	24	-0,86	0,3994	0,05	-1,9753	0,8153
CLasse LandMapR	1	5	0,1000	0,5855	24	0,17	0,8658	0,05	-1,1084	1,3084
CLasse LandMapR	1	6	0,09333	0,5520	24	0,17	0,8672	0,05	-1,0459	1,2326
CLasse LandMapR	1	7	-0,6500	0,8280	24	-0,79	0,4401	0,05	-2,3589	1,0589
CLasse LandMapR	2	3	1,9914	0,5111	24	3,90	0,0007	0,05	0,9367	3,0462
CLasse LandMapR	2	4	2,0000	0,6761	24	2,96	0,0069	0,05	0,6047	3,3953
CLasse LandMapR	2	5	2,6800	0,5855	24	4,58	0,0001	0,05	1,4716	3,8884
CLasse LandMapR	2	6	2,6733	0,5520	24	4,84	<,0001	0,05	1,5341	3,8126
CLasse LandMapR	2	7	1,9300	0,8280	24	2,33	0,0285	0,05	0,2211	3,6389
CLasse LandMapR	3	4	0,008571	0,5111	24	0,02	0,9868	0,05	-1,0462	1,0633
CLasse LandMapR	3	5	0,6886	0,3833	24	1,80	0,0850	0,05	-0,1025	1,4796
CLasse LandMapR	3	6	0,6819	0,3299	24	2,07	0,0497	0,05	0,001055	1,3628
CLasse LandMapR	3	7	-0,06143	0,6998	24	-0,09	0,9308	0,05	-1,5057	1,3829
CLasse LandMapR	4	5	0,6800	0,5855	24	1,16	0,2569	0,05	-0,5284	1,8884
CLasse LandMapR	4	6	0,6733	0,5520	24	1,22	0,2344	0,05	-0,4659	1,8126
CLasse LandMapR	4	7	-0,07000	0,8280	24	-0,08	0,9333	0,05	-1,7789	1,6389
CLasse LandMapR	5	6	-0,00667	0,4364	24	-0,02	0,9879	0,05	-0,9073	0,8940
CLasse LandMapR	5	7	-0,7500	0,7559	24	-0,99	0,3310	0,05	-2,3100	0,8100
CLasse LandMapR	6	7	-0,7433	0,7302	24	-1,02	0,3189	0,05	-2,2505	0,7638

ANOVA pour la variable pH, champ 3

Procédure MIXED de SAS

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
CLasse LandMapR	6	24	1,37	0,2663

Least Squares Means									
Effect	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	6,6550	0,5699	24	11,68	<,0001	0,05	5,4788	7,8312
CLasse LandMapR	2	5,6600	0,5699	24	9,93	<,0001	0,05	4,4838	6,8362
CLasse LandMapR	3	6,7050	0,2154	24	31,13	<,0001	0,05	6,2604	7,1496
CLasse LandMapR	4	6,9150	0,5699	24	12,13	<,0001	0,05	5,7388	8,0912
CLasse LandMapR	5	6,5625	0,4030	24	16,28	<,0001	0,05	5,7308	7,3942
CLasse LandMapR	6	7,3317	0,3290	24	22,28	<,0001	0,05	6,6526	8,0108
CLasse LandMapR	7	7,6000	0,8060	24	9,43	<,0001	0,05	5,9365	9,2635

Differences of Least Squares Means										
Effect	CLasse LandMapR	CLasse LandMapR	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
CLasse LandMapR	1	2	0,9950	0,8060	24	1,23	0,2290	0,05	-0,6685	2,6585
CLasse LandMapR	1	3	-0,05000	0,6093	24	-0,08	0,9353	0,05	-1,3075	1,2075
CLasse LandMapR	1	4	-0,2600	0,8060	24	-0,32	0,7498	0,05	-1,9235	1,4035
CLasse LandMapR	1	5	0,09250	0,6980	24	0,13	0,8957	0,05	-1,3481	1,5331
CLasse LandMapR	1	6	-0,6767	0,6581	24	-1,03	0,3141	0,05	-2,0349	0,6815
CLasse LandMapR	1	7	-0,9450	0,9871	24	-0,96	0,3479	0,05	-2,9823	1,0923
CLasse LandMapR	2	3	-1,0450	0,6093	24	-1,72	0,0992	0,05	-2,3025	0,2125
CLasse LandMapR	2	4	-1,2550	0,8060	24	-1,56	0,1325	0,05	-2,9185	0,4085
CLasse LandMapR	2	5	-0,9025	0,6980	24	-1,29	0,2083	0,05	-2,3431	0,5381
CLasse LandMapR	2	6	-1,6717	0,6581	24	-2,54	0,0180	0,05	-3,0299	-0,3135
CLasse LandMapR	2	7	-1,9400	0,9871	24	-1,97	0,0611	0,05	-3,9773	0,09731
CLasse LandMapR	3	4	-0,2100	0,6093	24	-0,34	0,7333	0,05	-1,4675	1,0475
CLasse LandMapR	3	5	0,1425	0,4569	24	0,31	0,7578	0,05	-0,8006	1,0856
CLasse LandMapR	3	6	-0,6267	0,3933	24	-1,59	0,1241	0,05	-1,4384	0,1850
CLasse LandMapR	3	7	-0,8950	0,8343	24	-1,07	0,2940	0,05	-2,6168	0,8268
CLasse LandMapR	4	5	0,3525	0,6980	24	0,51	0,6182	0,05	-1,0881	1,7931
CLasse LandMapR	4	6	-0,4167	0,6581	24	-0,63	0,5326	0,05	-1,7749	0,9415
CLasse LandMapR	4	7	-0,6850	0,9871	24	-0,69	0,4944	0,05	-2,7223	1,3523
CLasse LandMapR	5	6	-0,7692	0,5203	24	-1,48	0,1523	0,05	-1,8429	0,3046
CLasse LandMapR	5	7	-1,0375	0,9011	24	-1,15	0,2609	0,05	-2,8973	0,8223
CLasse LandMapR	6	7	-0,2683	0,8706	24	-0,31	0,7606	0,05	-2,0651	1,5284

***ANNEXE C : Fréquences des valeurs des descripteurs pédologiques en
fonction des classes de LandMapR© générées pour les bassins des
ruisseaux Ewing et Walbridge***

Bassin versant expérimental du ruisseau Ewing

Classe de pente (PENT)	Classes LandMapR® *					Tot
	1	2	3	4	5	
De 0 à 2 % [1]	0	0	2	2	0	4
De 2 à 5 % [2]	20	20	78	18	18	154
De 5 à 10 % [3]	4	13	9	3	0	29
Total	24	33	89	23	18	187

Fréquence manquante = 1

Code de l'horizon A (ACOD)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
[1]	0	0	0	1	0	1
[5]	0	0	1	0	0	1
Ap [10]	17	30	82	20	16	165
[11]	3	1	3	0	1	8
Ae [20]	0	1	0	0	0	1
Ah [30]	2	1	2	1	0	6
[31]	1	0	1	0	0	2
Modifié [90]	1	0	0	1	0	2
Total	24	33	89	23	17	186

Fréquence manquante = 1

Teinte de l'horizon A (ATEI)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
7,5 YR [4]	0	2	2	2	0	6
10,0 YR [5]	22	29	82	17	16	166
2,5 Y [6]	1	2	5	4	1	13
Total	23	33	89	23	17	185

Fréquence manquante = 2

Luminosité de l'horizon A (AVAL)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
20 [20]	3	1	12	2	4	22
25 [25]	0	1	3	2	0	6
30 [30]	13	22	56	15	10	116
35 [35]	4	5	11	2	2	24
40 [40]	2	2	6	2	1	13
45 [45]	1	0	1	0	0	2
50 [50]	0	2	0	0	0	2
Total	23	33	89	23	17	185

Fréquence manquante = 2

Saturation de l'horizon A (ACHR)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
10 [10]	1	2	13	4	3	23
15 [15]	0	0	3	0	1	4
20 [20]	10	8	49	10	10	87
25 [25]	1	4	4	1	0	10
30 [30]	10	13	19	7	3	52
35 [35]	0	3	0	1	0	4
60 [60]	1	2	1	0	0	4
40 [40]	0	1	0	0	0	1
Total	23	33	89	23	17	185

Fréquence manquante = 2

Sous-type de la structure (ASTR1)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
Polyédrique angulaire [4]	0	0	1	1	0	2
Polyédrique subangulaire [5]	7	18	31	9	8	73
Granulaire [6]	8	7	23	7	3	48
Massive [7]	9	6	34	6	6	61
Particulaire [8]	0	2	0	0	0	2
Total	24	33	89	23	17	186

Fréquence manquante = 1

Texture horizon A (ATEX)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
Sable loameux [16]	1	2	1	0	0	4
Sable fin loameux [17]	0	1	0	0	0	1
Loam sableux [20]	4	5	2	0	0	11
Loam sableux fin [21]	1	1	13	4	3	22
Loam sableux très fin [22]	0	2	4	2	1	9
Loam [23]	8	12	20	9	6	55
Loam limoneux [24]	3	6	16	5	1	31
Loam argileux [29]	2	3	13	1	3	22
Loam limoneux argileux [30]	3	1	15	1	1	21
Argile limoneuse [32]	1	0	1	0	0	2
Argile [33]	1	0	1	0	1	3
Argile loameuse [34]	0	0	0	0	1	1
<10% F Fro [41]	0	0	2	0	0	2
Total	24	33	88	22	17	184

Fréquence manquante = 3

Profondeur de la nappe (PNAP)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
35 à 44 cm [4]	0	0	0	1	0	1
45 à 54 cm [5]	0	0	1	0	0	1
85 à 94 cm [9]	2	0	0	0	0	2
95 à 104 cm [10]	0	0	2	1	0	3
105 à 114 cm [11]	0	0	3	0	2	5
115 à 125 cm [12]	0	1	1	1	1	4
Supérieure à 126 cm [13]	0	1	0	0	0	1
Total	2	2	7	3	3	17

Fréquence manquante = 170

Profondeur de gley (PGLE)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
0 à 04 cm [0]	0	2	3	0	2	7
5 à 14 cm [1]	0	0	1	0	0	1
15 à 24 cm [2]	3	5	12	5	4	29
25 à 34 cm [3]	3	11	42	8	4	68
35 à 44 cm [4]	3	3	12	5	7	30
45 à 54 cm [5]	2	4	10	2	0	18
55 à 64 cm [6]	2	3	2	0	1	8
65 à 74 cm [7]	1	1	2	0	0	4
75 à 84 cm [8]	0	2	1	0	0	3
85 à 94 cm [9]	3	0	1	0	0	4
95 à 104 cm [10]	1	0	0	0	0	1
Total	18	31	86	20	18	173

Fréquence manquante = 14

Classe de drainage (DRAI)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
Bien [3]	2	1	0	0	0	3
Modérée [4]	2	3	3	1	0	9
Imparfaite [5]	5	10	12	1	2	30
Mal drainée [6]	12	17	69	20	14	132
Très mal drainée [7]	2	1	2	0	2	7
Total	23	32	86	22	18	181

Fréquence manquante = 6

Bassin versant expérimental du ruisseau Ewing (suite)

Classe de structure (ASTR2)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
Sans structure [0]	9	8	34	6	6	63
Très fine à fine [2]	1	1	0	0	0	2
Structure fine [3]	4	4	11	3	2	24
Structure fine à moyenne [4]	8	13	24	7	6	58
Structure moyenne [5]	1	5	11	5	2	24
Structure moyenne à grossière [6]	1	2	7	1	1	12
Grossière [7]	0	0	2	1	0	3
Total	24	33	89	23	17	186

Fréquence manquante = 1

Grade de structure (ASTR3)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
Sans structure [1]	9	8	34	6	6	63
Très faible [2]	0	0	1	0	0	1
Faible [3]	8	6	17	6	2	39
Faible à modérée [4]	3	5	15	0	3	26
Modérée [5]	4	9	14	7	4	38
Modérée à forte [6]	0	1	6	3	2	12
Forte [7]	0	4	2	1	0	7
Total	24	33	89	23	17	186

Fréquence manquante = 1

* Les numéros des classes de LandMapR®, pour le bassin du ruisseau Ewing, correspondent aux classes suivantes :

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

Texture 1 du matériau 1 (M1T1)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
Organique ou fragmentaire [0]	0	0	2	0	0	2
Sableux grossier [1]	5	3	5	1	1	15
Sableux fin [2]	0	4	9	3	2	18
Loameux à sable grossier [3]	5	7	4	0	0	16
Loameux à sable fin [4]	2	4	21	9	4	40
Loameux à limon [5]	0	2	2	1	1	6
Loameux sable argileux [6]	3	3	7	3	1	17
Loameux limono-argileux [7]	1	9	12	5	2	29
Argileux [8]	5	0	13	0	2	20
Argileux lourd [9]	3	1	14	1	5	24
Total	24	33	89	23	18	187

Texture 2 du matériau 1 (M2T1)	Classes LandMapR®					Tot
	1	2	3	4	5	
Organique ou fragmentaire [0]	0	1	0	0	0	1
Sableux grossier [1]	2	1	6	1	0	10
Sableux fin [2]	1	0	1	1	0	3
Loameux à sable grossier [3]	1	3	4	2	0	10
Loameux à sable fin [4]	9	7	12	4	2	34
Loameux à limon [5]	0	2	4	0	0	6
Loameux sable argileux [6]	1	3	5	3	1	13
Loameux limono-argileux [7]	2	4	5	0	2	13
Argileux [8]	1	3	24	4	8	40
Argileux lourd [9]	1	2	21	5	4	33
Total	18	26	82	20	17	163

Fréquence manquante = 24

Bassin versant expérimental du ruisseau Walbridge

Classe de pente (PENT)	Classes LandMapR® *							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
De 2 à 5% [2]	4	0	23	3	8	5	2	45
De 5 à 10 % [3]	5	1	7	5	1	0	1	20
Total	9	1	30	8	9	5	3	65

Fréquence manquante = 1

Code de l'horizon A (ACOD)	Classes LandMapR® *							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
Ap [10]	6	1	23	7	6	4	2	49
Apg [11]	0	0	1	0	2	0	1	4
Apk [13]	0	0	0	1	0	0	0	1
Ae [20]	0	0	0	0	1	0	0	1
Ah [30]	2	0	6	0	0	0	0	8
Modifié [90]	1	0	0	0	0	1	0	2
Total	9	1	30	8	9	5	3	65

Fréquence manquante = 1

Teinte de l'horizon A (ATEI)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
7,5 YR [4]	0	0	0	0	1	0	0	1
10,0 YR [5]	7	1	19	8	8	5	3	51
2,5 Y [6]	1	0	0	0	0	0	0	1
Total	8	1	19	8	9	5	3	53

Fréquence manquante = 13

Luminosité de l'horizon A (AVAL)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
20 [20]	1	0	3	1	2	0	1	8
30 [30]	5	0	21	7	4	5	2	44
35 [35]	0	1	0	0	0	0	0	1
40 [40]	2	0	4	0	3	0	0	9
50 [50]	0	0	2	0	0	0	0	2
Total	8	1	30	8	9	5	3	64

Fréquence manquante = 2

Saturation de l'horizon A (ACHR)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
10 [10]	0	0	1	0	2	0	1	4
20 [20]	2	0	7	3	4	5	0	21
30 [30]	4	0	17	3	3	0	2	29
35 [35]	0	1	1	0	0	0	0	2
40 [40]	2	0	4	2	0	0	0	8
Total	8	1	30	8	9	5	3	64

Fréquence manquante = 2

Sous-type de la structure (ASTR1)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
Polyédrique subangulaire [5]	0	0	2	0	0	0	0	2
Granulaire [6]	6	1	16	5	6	3	2	39
Massive [7]	2	0	12	3	3	2	1	23
Total	8	1	30	8	9	5	3	64

Fréquence manquante = 2

Classe de structure (ASTR2)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
Sans structure [0]	2	0	12	3	3	2	1	23
Structure fine [3]	1	1	8	1	2	0	0	13
Structure fine à moyenne [4]	4	0	7	3	4	3	0	21
Structure moyenne [5]	1	0	2	1	0	0	2	6
Structure moyenne à grossière [6]	0	0	1	0	0	0	0	1
Total	8	1	30	8	9	5	3	64

Fréquence manquante = 2

Grade de structure (ASTR3)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
Sans structure [1]	2	0	12	3	3	2	1	23
Faible [3]	5	0	7	2	2	0	1	17
Faible à modérée [4]	0	1	4	2	1	2	0	10
Modérée [5]	1	0	4	1	1	1	1	9
Modérée à forte [6]	0	0	2	0	2	0	0	4
Forte [7]	0	0	1	0	0	0	0	1
Total	8	1	30	8	9	5	3	64

Fréquence manquante = 2

Texture horizon A (ATEX)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
Sable grossier loameux [15]	0	0	0	1	0	0	0	1
Sable loameux [16]	0	1	0	0	0	0	0	1
Sable fin loameux [17]	0	0	0	0	0	1	0	1
Loam sableux [20]	3	0	5	2	1	0	1	12
Loam sableux fin [21]	0	0	3	0	0	1	0	4
Loam [23]	5	0	15	5	5	1	1	32
Loam limoneux [24]	0	0	7	0	3	2	1	13
Total	8	1	30	8	9	5	3	64

Fréquence manquante = 2

Profondeur de gley (PGLE)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
0 à 04 cm [0]	0	0	1	0	2	0	1	4
15 à 24 cm [2]	2	0	5	1	1	1	0	10
25 à 34 cm [3]	0	0	4	3	2	3	2	14
35 à 44 cm [4]	2	0	5	0	0	1	0	8
45 à 54 cm [5]	2	0	4	1	0	0	0	7
55 à 64 cm [6]	1	0	2	0	0	0	0	3
65 à 74 cm [7]	0	0	3	1	3	0	0	7
75 à 84 cm [8]	0	0	1	0	0	0	0	1
85 à 94 cm [9]	0	0	2	0	0	0	0	2
Total	7	0	27	6	8	5	3	56

Fréquence manquante = 10

Classe de drainage (DRAI)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
Bien [3]	1	0	3	1	0	0	0	5
Modérée [4]	1	1	4	2	2	0	0	10
Imparfaite [5]	5	0	10	1	0	0	0	16
Mal drainée [6]	2	0	13	4	6	5	3	33
Total	9	1	30	8	8	5	3	64

Fréquence manquante = 2

Texture 1 du matériau 1 (M1T1)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
Sableux grossier [1]	1	1	6	4	0	1	0	13
Sableux fin [2]	0	0	0	0	0	1	0	1
Loameux à sable grossier [3]	5	0	10	2	1	0	2	20
Loameux à sable fin [4]	2	0	9	1	4	1	0	17
Loameux sable argileux [6]	1	0	5	1	4	2	1	14
Total	9	1	30	8	9	5	3	65

Fréquence manquante = 1

Texture 2 du matériau 1 (M2T1)	Classes LandMapR®							Tot
	1	2	3	4	5	6	7	
Fragmentaire [0]	0	1	0	0	0	0	0	1
Sableux grossier [1]	2	0	2	3	1	1	0	9
Loameux à sable grossier [3]	1	0	8	0	5	1	1	16
Loameux à sable fin [4]	2	0	9	1	1	3	2	18
Loameux à limon [5]	0	0	1	0	0	0	0	1
Loameux sable argileux [6]	1	0	4	0	0	0	0	5
Total	6	1	24	4	7	5	3	50

Fréquence manquante = 16

* Les numéros de classes de LandMapR®, pour le bassin du ruisseau Walbridge, correspondent aux classes suivantes :

- 1 = Crête aplatie
- 2 = Épaulement divergent
- 3 = Revers de pente
- 4 = Revers de pente divergent
- 5 = Terrasse
- 6 = Bas de pente
- 7 = Niveau le plus bas de la pente