

Note de recherche / Research Note

Structures et relations spatiales entre les images aériennes multi-spectrales, les propriétés du sol et les rendements de grandes cultures

Aubert Michaud, Isabelle Landry, Camille Desmarais et Charles Savoie

Résumé. Les images aériennes numériques captées à des stades critiques de développement des cultures et de conditions du sol sont des outils prometteurs à l'égard de la gestion localisée des sols et des grandes cultures, dans la mesure où : (1) les images acquises reflètent la variabilité spatiale des propriétés stables du sol et du potentiel de rendement des cultures et (2) ces structures spatiales s'expriment à une échelle gérable par le gestionnaire de l'exploitation agricole. Dans le but d'évaluer le potentiel des images numériques aériennes à supporter la gestion localisée des sols et des cultures, l'intégration et l'analyse spatiale, dans les domaines temporel et fréquentiel, de données de rendement des cultures, du relief des champs, des propriétés physico-chimiques du sol et d'images multi-spectrales captées au printemps et à l'été ont été réalisées pour quatre champs de la région des Bois-Francs et 2 années de production. Les images multi-spectrales acquises en début de saison de croissance ont reflété la variabilité des rendements au battage, lorsque celle-ci présentait une structure spatiale significative. Les images captées hâtivement au printemps, suivant le hersage du sol, et les modèles numériques d'élévation ont révélé de façon significative la structure spatiale des propriétés physico-chimiques du sol. Dans l'ensemble, les échelles spatiales de variabilité observées sont compatibles avec une gestion localisée des sols et des cultures.

Abstract. Aerial numerical images captured under critical soil conditions and crop stages are promising tools for crop and soil zone management if (1) images reflect the spatial structure of stable soil properties and crop yield potential and (2) spatial scales of variability of soil properties and crop yield potential are manageable. To assess the potential of numeric aerial images to support soil and crop zone management, spatial integration and geostatistical analysis in time and frequency domains of yield, topography, physico-chemical soil properties and aerial multi-spectral images, captured in spring and summer, have been supported for four fields from the Bois-Francs region, in Québec, and 2 years of production. Early summer images predicted monitored yield for experimental sites demonstrating significant spatial structure in crop productivity. Early spring images captured over harrowed soils and numerical elevation models revealed spatial structures of soil physico-chemical properties. Scales of spatial variability are generally compatible with soil and crop zone management.

Introduction

Le concept de gestion localisée en agriculture repose sur la reconnaissance de zones de sol présentant des propriétés du sol contrastantes, qui influent sur le développement et le rendement des cultures. Atherton et al. (1999) concluent, sur la base des études nord-américaines ciblées sur les relations spatiales entre le sol et le développement des cultures, que les propriétés stables et la condition physique du sol expliquent mieux la variabilité des rendements que la richesse du sol en ses éléments nutritifs. Au Québec, Nolin et al. (2000) ont principalement associé la variabilité spatiale du rendement de soya aux propriétés intrinsèques du sol. En services-conseils agronomiques, les images aériennes et la cartographie du micro-relief des champs sont utilisés dans le diagnostic de l'égouttement des champs, le développement des cultures et la suffisance de l'azote (Rivest, 2000; Rivest et Gosselin, 2002).

Les développements technologiques récents en matière de télédétection, de capteurs embarqués et d'outils géomatiques permettent un développement accéléré des approches de gestion intra-parcellaire des sols et des cultures. La base du processus décisionnel en gestion localisée est l'étude de la variabilité spatiale du développement et du rendement des

Reçu le 12 décembre 2001. Accepté le 21 août 2002.

A. Michaud¹ et I. Landry. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, QC G1P 3W8, Canada.

C. Desmarais. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, Direction régionale Centre-du-Québec, 460, boulevard Louis Fréchette, Nicolet, QC J3T 1Y2, Canada.

C. Savoie. Ministère de l'agriculture des pêcheries et de l'alimentation, Direction de l'environnement et du développement durable, 200, chemin Sainte-Foy, Québec, QC G1R 4X6, Canada.

1. Auteur correspondant (courriel : aubert.michaud@irda.qc.ca).

cultures (Michaud et al., 2000). L'absence de structure spatiale dans les données de rendement, ou une variabilité sur de trop courtes distances, justifie difficilement l'investissement dans l'acquisition de données supplémentaires. En second lieu, l'acquisition de données représentatives de la variabilité spatiale des propriétés du sol cible la représentation de zones de champ contrastantes au plan de ses caractéristiques physico-chimiques. Enfin, l'intégration et l'analyse des données pertinentes aux cultures et aux propriétés du sol supporte l'interprétation des causes de la variabilité du rendement. Dans le cadre de la présente étude, l'intégration et l'analyse spatiale des images numériques et autres données à référence spatiale avait pour objectif d'évaluer (1) dans quelle mesure les images multi-spectrales acquises à l'été traduisent la variabilité spatiale du rendement des cultures en fin de saison et (2) dans quelle mesure des images multi-spectrales acquises au printemps traduisent la variabilité spatiale des propriétés du sol.

Méthodologie

Les quatre sites retenus pour l'étude présentent des différences contrastantes au plan de leurs origines pédogénétiques (alluvions récentes et argiles marines), du relief, de l'égouttement et de la texture des horizons superficiels (sable à argile). La cartographie des micro-reliefs par capture GPS bi-fréquence (Brunelle et Savoie, 2000) a été intégrée aux données de la présente étude. Les images aériennes multi-spectrales acquises par une caméra Xybio à résolution de 720×480 pixels (précision au sol de 1 m) comprennent trois bandes, soit le vert (550 ± 35 nm), le rouge (650 ± 35 nm) et le proche infra-rouge (800 ± 40 nm). Les images printanières ont été captées le 6 juin 1998 et le 11 mai 1999, en conditions de sol relativement sèches. Les images estivales ont été captées les 24 août 1998 et 12 juillet 1999. En post-traitement, les images ont été mises en registre, en raison des délais occasionnés par l'enregistrement de chacune des bandes (30 images/s), assemblées en mosaïque et géoréférencées sur la base de points de contrôle enregistrés sur capteur GPS sur le terrain.

Les données de rendement ont été enregistrées par des moniteurs commerciaux intégrés aux moissonneuses-batteuses. Les données brutes extraites des moniteurs ont été corrigées pour l'humidité du grain de même que pour différentes sources d'erreur associées aux manœuvres au champ, notamment pour les délais survenant entre l'enregistrement du positionnement et la lecture du rendement (décalage spatial), les variations de vitesse d'avancement de la batteuse, le relevage du nez de la batteuse et les variations dans la largeur de fauche. Cette dernière problématique survient particulièrement dans les champs ensemencés à interligne étroit comme les céréales à paille et le soya. L'enregistrement manuel ou automatique de la largeur de coupe est alors essentiel. L'absence de cette information a occasionné le rejet des données de rendement au site expérimental D.

Les sols ont été échantillonnés selon des dispositifs en transects longitudinaux et transversaux suivant la récolte du maïs-grain à l'automne, à un pas d'échantillonnage de 12,2 m, à

l'exception du site C, où la largeur de la parcelle a imposé un pas de 6,1 m aux transects transversaux. Les déterminations des propriétés physico-chimiques ont été effectuées au laboratoire ISO-9002 de l'IRDA, suivant les méthodes établies par la section méthodologie de la Commission des sols (Conseil des productions végétales du Québec, 1993) pour le pH, l'azote ammoniacal et les nitrates, les éléments extraits au Mehlich-3 (P, K, Ca, Mg, Na et oligo-éléments) et le carbone organique. La caractérisation des propriétés physiques des sites a inclus les déterminations de l'humidité pondérale, la densité apparente, la macroporosité (50 à 100 cm) et la conductivité hydraulique saturée.

Finalement, l'intégration spatiale des données en format matriciel a été réalisée avec le support du logiciel TNT-Mips (Microimages, 1999). La **figure 1** illustre l'intégration spatiale des données pour les quatre sites expérimentaux pour l'année de référence 1999. La conversion des données de rendements et d'élévation au format matriciel a été supportée par la méthode de l'inverse du carré de la distance. L'échelle d'intégration spatiale des données a été dictée par la largeur de la barre de coupe des moissonneuses-batteuses utilisées par les entreprises agricoles. Les analyses statistiques ont ainsi été réalisées suivant un ré-échantillonnage des données matricielles selon une dimension-référence de pixel de 6,1 m. Les analyses statistiques linéaires ont été réalisées avec le support des logiciels SAS (Statistical analysis system, 2000) et les analyses géostatistiques dans les domaines temporel et fréquentiel avec le support du logiciel WASTSA (Shumway et Stoffer, 2000). L'hypothèse de l'effet de la fréquence sur la variance a été vérifiée par l'étude du périodogramme intégré de chaque variable. Précédant l'analyse des données dans le domaine fréquentiel, les tendances linéaires dans les données ont été extraites, les données aberrantes ont été exclues sur la base de l'analyse de la normalité de la distribution.

Résultats et discussion

Variabilité spatiale des rendements

Les semi-variogrammes des données de rendements mesurés en transects longitudinaux aux sites expérimentaux sont rapportés au **tableau 1**. Les moyennes de rendements relativement élevées pour les 2 années de culture reflètent des conditions climatiques exceptionnellement favorables en 1998 et 1999. Les portées des semi-variogrammes dans l'axe longitudinal des parcelles sont relativement stables pour un site donné et indiquent que la variabilité spatiale du rendement au site A s'exprime à une échelle beaucoup plus fine (100 m) qu'aux sites B et C (200 m). Ces structures spatiales s'apparentent aux semi-variogrammes de rendements de maïs-grain et de soya des régions côtières américaines rapportés par Sadler et al. (1998), qui estimaient des portées de l'ordre de 57 à 252 m. Dans l'axe transversal aux parcelles cependant, les structures spatiales du rendement apparaissent aléatoires ou d'une portée très courte (30 m). Plusieurs facteurs peuvent contribuer à la complexité de modéliser la variabilité spatiale

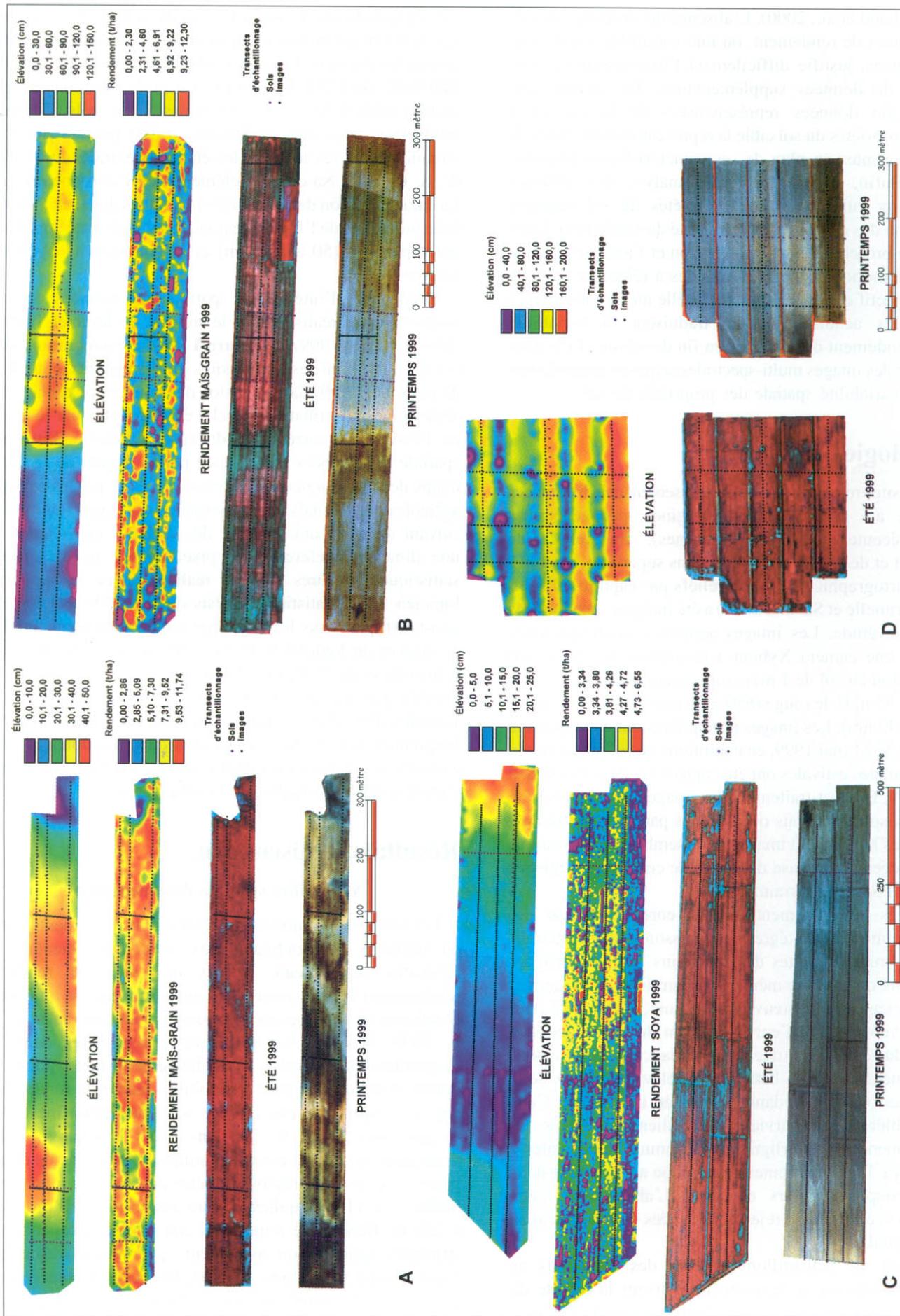


Figure 1. Représentation des données à référence spatiale aux sites A, B, C et D, incluant le modèle numérique d'élévation, le rendement des cultures, les images numériques multi-spectrales printanières et estivales (composite couleur RGB), de même que les transects d'échantillonnage des images et du sol.

Tableau 1. Propriétés de la variabilité spatiale longitudinale du rendement des cultures selon un dispositif en trois transects aux sites A, B et C.

Site	An	Culture	N	Moy. (T/ha)	Cv. (%)	Transect n°	Semi-variogrammes ^a			
							Co	C	A	C/(Co + C)
A	1998	Maïs	409	8,92	12	1	0,51	1,01	92	0,66
						2	0,76	1,40	92	0,65
						3	0,31	1,04	116	0,77
A	1999	Maïs	418	8,63	15	1	0,39	1,93	92	0,83
						2	0,48	1,97	98	0,80
						3	0,35	1,22	67	0,78
B	1998	Orge	547	4,11	21	1	0,23	0,82	171	0,78
						2	0,15	0,63	171	0,81
						3	0,25	0,60	214	0,71
B	1999	Soya	547	3,70	18	Structure aléatoire				
C	1998	Maïs	427	8,97	11	1	0,23	0,82	171	0,78
						2	0,15	0,65	201	0,81
						3	0,25	0,64	220	0,72
C	1999	Orge	427	3,18	40	Structure aléatoire				

^aModèle sphérique : Co, constante de pépité; C, plateau; A, portée (m).

dans l'axe transversal aux parcelles, dont la forme étroite du parcellaire, typique au cadastre québécois, le décalage spatial d'observations en raison du patron de circulation de la batteuse, de même qu'une variabilité spatiale de très courte portée des propriétés du sol, héritée des pratiques de gestion des champs.

Relations spatiales rendement–images

Les relations spatiales entre les images multi-spectrales d'été et les rendements de culture au battage ont été étudiées le long des transects longitudinaux décrits au **tableau 1**. Le domaine fréquentiel s'est révélé bien adapté à l'étude de la variabilité spatiale intra-parcellaire du rendement et des images multi-spectrales estivales pour plusieurs raisons :

- L'étude des périodogrammes intégrés des variables rendements et réflectance en proche infra-rouge a démontré pour tous les transects à l'étude que ces variables avaient une variance significativement affectée par la fréquence (niveau de probabilité de 0,01). Il n'est alors pas indiqué de procéder à l'analyse bivariée dans le domaine temporel en raison du postulat de stationnarité des observations (Shumway et Stoffer, 2000).
- Le domaine fréquentiel est avantageux compte tenu de la nature « bruyante » des données acquises à distance ou par capteurs embarqués. La transformation des données permet en effet de représenter les relations spatiales à des fréquences ou périodes pertinentes, auxquelles s'expriment la majeure partie de la variabilité.
- La cohérence (équivalent à la corrélation dans le domaine fréquentiel) entre les variables est estimée sur la base des fréquences pertinentes. La variabilité associée aux périodes

non pertinentes (bruit de fond) sont exclues de l'estimation de la cohérence à une période d'intérêt donnée.

- Enfin, l'intégration spatiale de données est un processus laborieux, et le déphasage de données de diverses sources n'est pas exclu à priori. L'analyse dans le domaine fréquentiel comporte l'avantage de détecter les relations spatiales bivariées malgré la présence d'un déphasage; la fonction de transfert permet de chiffrer au besoin le décalage spatial.

La **figure 2** illustre la relation spatiale entre le compte numérique de l'image estivale en proche infra-rouge et le rendement de la culture au battage pour le transect n° 1 du site A pour l'année 1999. Alors que 26 % de la variabilité du rendement en fin de saison est expliquée en mode de régression linéaire par le compte numérique de l'image estivale en proche infra-rouge ($r = 0,51$; $p < 0,001$), jusqu'à 80 % de la variabilité est expliquée dans le domaine fréquentiel (cohérence) pour les périodes dominantes des structures spatiales du rendement et de l'image. Ces estimations confirment la nette supériorité du domaine fréquentiel à détecter des structures spatiales comparativement aux approches en mode linéaire ou temporel, tel que démontré par Tremblay (1999). Le **tableau 2** décrit les périodogrammes et les cohérences des relations images–rendement pour les sites expérimentaux A, B et C. Dans l'ensemble, les cohérences estimées démontrent que les survols estivaux hâtifs réalisés en 1999 expriment mieux la structure spatiale de la condition des cultures que les survols tardifs réalisés en 1998. Cette observation supporte la recommandation de capter des images des champs au moment où les variations dans l'indice foliaire du couvert végétal sont maximales (Piekutowski, 2000). Les périodes auxquelles le rendement et les comptes numériques des images en proche

Tableau 2. Relations spatiales dans le domaine fréquentiel entre le rendement des grandes cultures et les comptes numériques en proche

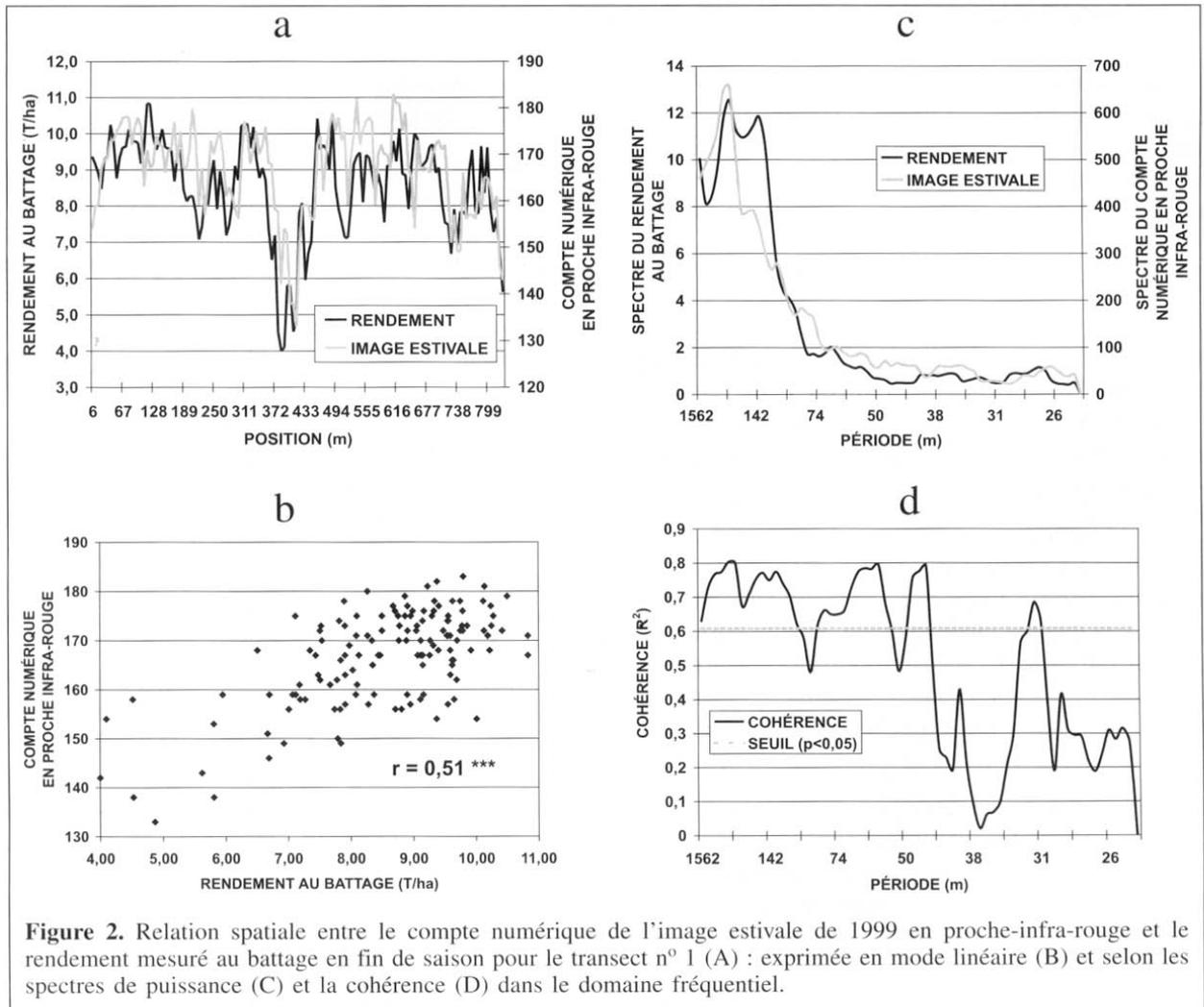
Site	An	Cult.	N	Observation	Transect d'échantillonnage n° 1			
					Tend. lin. ^a	Per. int. ^b	Périodes dominantes ^c (m)	Périodes (m) cohérentes ^d (r)
A	1998	Maïs	136	Rendement	*	*	98–312	120–156
				Image	NS	*	120–780	(>0,61)
A	1999	Maïs	136	Rendement	*	*	130–780	104–780
				Image	*	*	223–780	(>0,61)
B	1998	Orge	191	Rendement	*	*	390–780	390–780
				Image	*	*	260–780	(>0,46)
C	1998	Maïs	143	Rendement	NS	*	98–260	NS
				Image	NS	*	120–520	(<0,57)
C	1999	Orge	143	Rendement	NS	*	312–780	NS
				Image	NS	*	130–390	(<0,57)

^aRésultat du test de tendance linéaire. La tendance est extraite lorsque significative (*, $p < 0,05$), précédant l'analyse en mode fréquentiel.

^bUn résultat significatif du test du périodogramme intégré (*, $p < 0,05$) indique que la variance varie en fonction de la fréquence (hypothèse du bruit blanc rejetée).

^cPériodes correspondantes aux valeurs élevées du spectre de puissance.

^dPériodes auxquelles les périodogrammes du rendement et de la réflectance en proche infra-rouge apparaissent significativement cohérentes au seuil de $p < 0,05$.



infra-rouge apparaissent significativement cohérentes traduisent les échelles décroissantes des variabilités spatiales

de ces variables, respectivement observées aux sites A, B et C. Dans l'ensemble, les périodes cohérentes relativement longues

infra-rouge des images estivales selon un dispositif en trois transects longitudinaux aux sites A, B et C.

Transect d'échantillonnage n° 2				Transect d'échantillonnage n° 3			
Tend. lin. ^a	Per. int. ^b	Périodes ^c dominantes (m)	Périodes (m) cohérentes ^d (r)	Tend. lin. ^a	Per. int. ^b	Périodes ^c dominantes (m)	Périodes (m) cohérentes ^d (r)
NS	*	142–390	NS	NS	*	223–520	NS
*	*	130–780	(<0,61)	NS	*	112–195	(<0,61)
*	*	173–312	195–312	NS	*	112–780	87–120
*	*	156–780	(>0,61)	NS	*	260–780	(>0,61)
*	*	223–780	142–195	*	*	312–780	520–780
*	*	142–312	(>0,461)	*	*	312–780	(>0,46)
*	*	173–520	NS	*	*	173–520	NS
NS	*	120–223	(<0,57)	NS	*	120–223	(<0,57)
*	*	312–780	390–780	NS	*	312–780	780
*	*	312–781	(>0,61)	NS	*	312–781	(>0,61)

(87 à 780 m) n'écarteront pas la faisabilité d'une gestion localisée des sols et des cultures pour ces sites.

Relations spatiales propriétés du sol–images

Le **tableau 3** décrit les propriétés des semi-variogrammes du taux de matière organique, du pH et de la richesse en phosphore selon les transects d'échantillonnage longitudinaux et latitudinaux aux quatre sites expérimentaux. Le court pas d'échantillonnage (12,2 m) a permis de détecter des portées relativement courtes pour ces trois propriétés, de même qu'une dominance des structures spatiales cycliques. Le test du périodogramme intégré appliqué à chacune des variables a révélé une distribution de la variance indépendante de la fréquence, permettant ainsi une analyse bivariée en mode temporel de la relation entre les réflectances printanières et les propriétés du sol. L'analyse de la normalité de la distribution des données a par ailleurs révélé aucune donnée aberrante. La fonction de corrélation croisée (FCC) a été privilégiée à la corrélation classique de façon à soustraire les effets d'autocorrélation des données de l'analyse de la relation spatiale entre l'image et les propriétés du sol.

La **figure 3** illustre deux exemples de distributions spatiales fortement contrastantes de la matière organique du sol, soit la structure cyclique du transect transversal associée au site D et la structure linéaire associée au transect longitudinal du site C. La fonction de corrélation croisée estimée au site C en 1998 démontre que le taux de matière organique, l'élévation et le compte numérique de l'image printanière en lumière verte en 1998 sont bien en phase et projettent une corrélation décroissante à mesure que les observations sont plus distantes. Au site D, la nature cyclique de la FCC, induite par l'aménagement de planches bombées, implique que les mesures du taux de MO du sommet d'une planche donnée sont corrélées aux sommets des planches voisines, laissant apparaître des corrélations croisées significatives présentant un

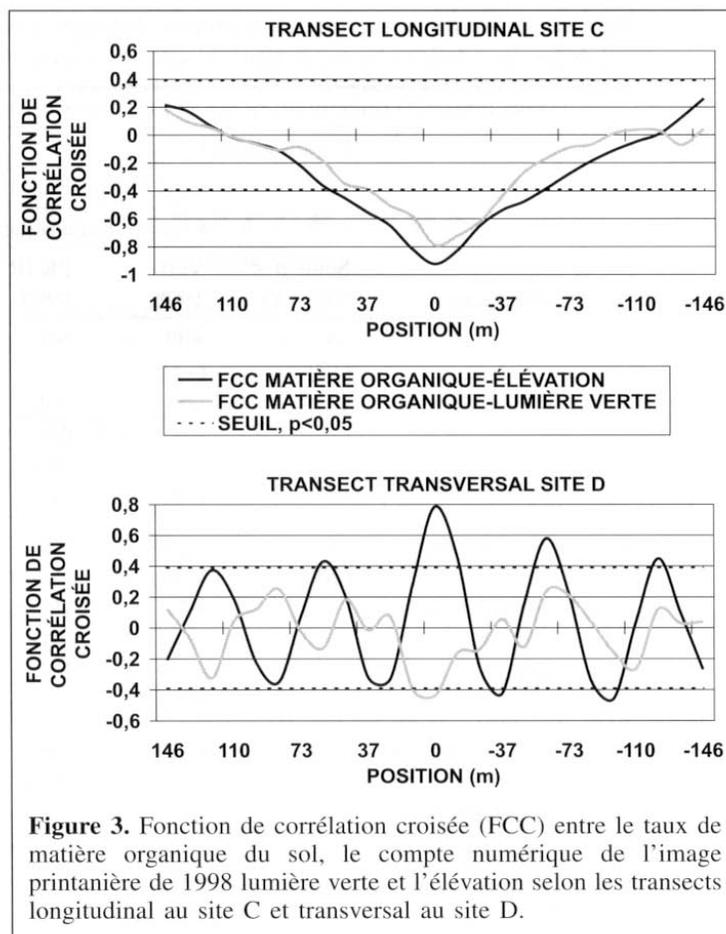


Figure 3. Fonction de corrélation croisée (FCC) entre le taux de matière organique du sol, le compte numérique de l'image printanière de 1998 lumière verte et l'élévation selon les transects longitudinal au site C et transversal au site D.

fort décalage spatial. Le **tableau 4** décrit les FCC pour l'ensemble des sites et transects entre les propriétés du sol, les réflectances printanières du sol et le relief du parcellaire. Les comptes numériques en couleur verte en 1998 et en proche infra-rouge en 1999 ont été retenues en raison de leur pouvoir discriminant sur les propriétés du sol. Le survol en 1998, réalisé dans des conditions de sol très sec, a démontré un meilleur

Tableau 3. Propriétés des semi-variogrammes du taux de matière organique, du pH et de la richesse du sol en phosphore selon les transects d'échantillonnage longitudinaux et latitudinaux aux quatre sites expérimentaux.

		Semi-variogrammes selon les transects							
Site	Propriété	Longitudinaux				Transversaux			
		<i>N</i>	<i>A</i> (m)	<i>C</i> /(<i>Co</i> + <i>C</i>)	Mod. ^a struct.	<i>N</i>	<i>A</i> (m)	<i>C</i> /(<i>Co</i> + <i>C</i>)	Mod. ^a struct.
A	% mat. org.	17	37	0,65	C	12	24	0,83	S
	P (Mehlich-3)		61	0,66	C		37	0,86	S
	pH		24	0,66	C		12	0,55	S
B	% mat. org.	20	37	0,54	C	20	24	0,59	C
	P (Mehlich-3)		110	0,79	S		73	0,67	C
	pH		73	0,98	S		73	0,68	C
C	% mat. org.	25	146	0,85	L	18	73	0,77	S
	P (Mehlich-3)		49	0,64	C		85	0,76	S
	pH		49	0,76	C		61	0,64	S
D	% mat. org.	21	61	0,84	S	25	31	0,65	C
	P (Mehlich-3)		110	0,70	C		37	0,63	C
	pH		122	0,89	L		24	0,52	C

^aModèle dominant de la structure spatiale : S, sphérique; L, linéaire; C, cyclique; Co, constante de pépite; C, plateau; A, portée.

Tableau 4. Fonctions de corrélation croisée dominantes entre les propriétés du sol et les images printanières du sol selon des axes longitudinaux et transversaux aux quatre sites expérimentaux.

		Fonctions de corrélation croisée (FCC) selon les transects ^a							
Site	Propriété	Longitudinaux				Transversaux			
		Seuil <i>p</i> < 0,05 (<i>N</i>)	FCC (%) et retard (Pas de 12,2 m)			Seuil <i>p</i> < 0,05 (<i>N</i>)	FCC (%) et retard (Pas de 12,2 m) ^b		
			Compte numérique				Compte numérique		
			Vert-1998	PR.IR-1999	Élévation		Vert-1998	PR.IR-1999	Élévation
A	% mat. org.	48 (17)	+69 (-1)	NS	NS	57 (12)	-82 (-1)	NS	-78 (+4)
	P (Mehlich-3)		-69 (0)	+56 (0)	+75 (0)		-69 (-1)	NS	-76 (+3)
	pH		-65 (+6)	+48 (+3)	NS		NS	NS	NS
B	% mat. org.	44 (20)	+60 (+8)	NS	-44 (+2)	42 (21)	-46 (+4)	NS	NS
	P (Mehlich-3)		+44 (8)	70 (0)	+44 (+2)		-44 (+4)	+52 (+6)	+45 (+6)
	pH		+75 (+1)	NS	-68 (0)		+52 (+4)	NS	+45 (+8)
C	% mat. org.	34 (25)	+79 (0)	-55 (+4)	+92 (0)	48 (18)	-81 (0)	-48 (+1)	+81 (0)
	P (Mehlich-3)		+53 (+1)	+52 (+4)	+51 (+2)		-84 (0)	-56 (-1)	+74 (0)
	pH		+46 (+4)	+44 (+11)	NS		NS	NS	NS
D	% mat. org.	42 (21)	-63 (0)	NS	+51 (-4)	39 (25)	-43 (0)	-54 (-1)	+78 (0)
	P (Mehlich-3)		+58 (+8)	NS	+76 (+3)		NS	-51 (0)	+67 (0)
	pH		NS	NS	+76 (+3)		NS	NS	-48 (0)

^aCorrélation maximale de la fonction FCC (%) et déphasage exprimé en multiple du pas d'échantillonnage.

^bPas d'échantillonnage de 12,2 m, à l'exception du transect transversal au site A (6,1 m).

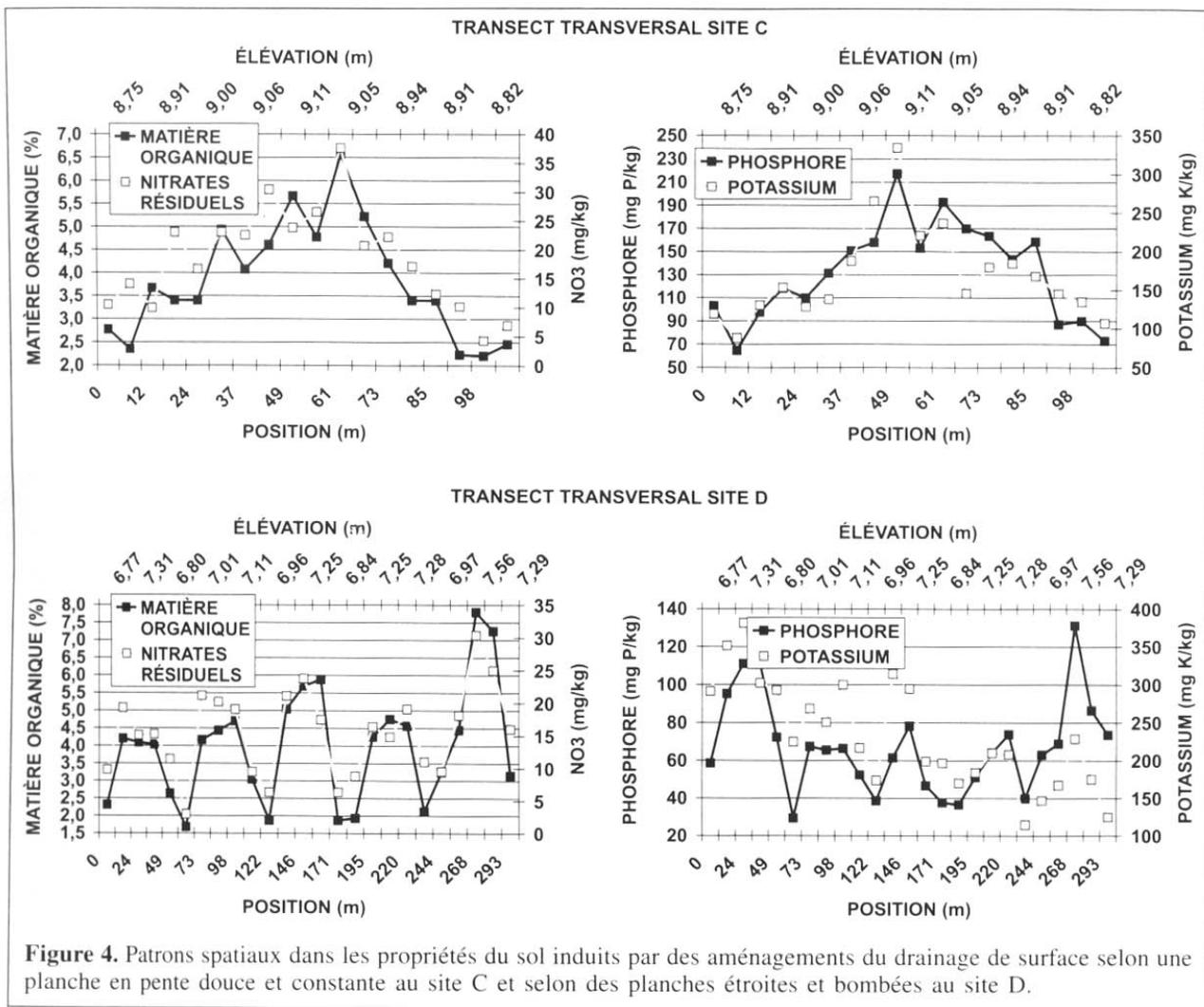


Figure 4. Patrons spatiaux dans les propriétés du sol induits par des aménagements du drainage de surface selon une planche en pente douce et constante au site C et selon des planches étroites et bombées au site D.

pouvoir explicatif de la variabilité spatiale des propriétés physico-chimiques du sol que le survol de 1999, réalisé en condition de sol plus humide.

Pour l'ensemble des sites et transects à l'étude, c'est la variabilité spatiale du taux de matière organique qui est révélée avec le plus d'intensité par l'élévation et l'imagerie multi-spectrale, suivi de la richesse en phosphore et du pH. La majorité des corrélations croisées significatives n'apparaissent pas décalées. Les corrélations significatives présentant des décalages spatiaux importants reflètent la nature cyclique des structures spatiales des propriétés du sol. La distribution spatiale des taux de matière organique exprime nettement l'effet des pratiques culturales et de l'aménagement des terres. Au Québec, beaucoup d'investissements ont été consentis dans l'amélioration de l'égouttement des terres, tels que le façonnement de planches bombées par les labours, le nivellement et le comblement de dépressions, le drainage souterrain et l'étalement des remblais suite au creusement des cours d'eau municipaux. La **figure 4** compare les propriétés chimiques du sol selon un échantillonnage en transect transversal aux planches bombées du site D, et transversal à la planche unique à pente constante du site C. Dans les deux cas, la structure spatiale des richesses du sol en éléments nutritifs est fortement influencée par le profilage de la parcelle.

Conclusion

Les relations spatiales observées dans le cadre de la présente étude entre les images numériques printanières et estivales, le modèle numérique de terrain, les propriétés du sol et le rendement des cultures mettent en relief le potentiel de l'imagerie et du relief de précision comme supports de première ligne en gestion localisée des sols et des cultures.

Au plan de l'analyse spatiale, le grand nombre de données générées par les capteurs de rendements, l'imagerie aérienne et le micro-relief offre l'avantage d'étudier les structures spatiales dans le domaine fréquentiel, ce qui est très utile dans un contexte d'intégration de données bruyantes et possiblement déphasées. Compte tenu des particularités spatiales du cadastre québécois et de la généralisation des aménagements hydro-agricoles, une attention particulière doit être apportée à la redistribution de la matière organique révélée par le micro-relief, l'identification de structures spatiales cycliques, et la forte anisotropie dans les propriétés du sol. Dans ce contexte, l'interpolation spatiale de données relatives aux propriétés du sol et au développement des cultures a donc avantage à considérer des rayons de recherche contrastants selon les axes transversaux et longitudinaux du parcellaire.

Ultimement, le projet d'intégration de données à référence spatiale a pour but de cartographier la variabilité intra-parcellaire des propriétés du sol et de mettre en relation ces zones avec le rendement des cultures. Une donnée de rendement, de relief ou de fertilité, à elle seule, est d'un support limité à la gestion. L'intégration et l'analyse spatiale des données demeure à la base du processus décisionnel en gestion localisée des sols et des cultures. Si nous disposons de plus en plus d'opportunités technologiques à l'égard de la caractérisation à distance ou par capteurs embarqués des sols et du couvert végétal, le développement d'utilitaires géomatiques et géostatistiques conviviaux, intégrant notamment des outils d'analyse spatiale dans le domaine fréquentiel, demeure une priorité en matière de transfert technologique de la télédétection dans le domaine de la gestion localisée des sols et des cultures.

Remerciements

La réalisation de ce projet de recherche a été rendue possible grâce aux collaborations de Jean Caron, professeur, Département des Sols et du génie agroalimentaire, FSAA, Université Laval; Victor Savoie, André Brunelle et Jacques Goulet, Ministère de l'Agriculture, pêcheries et alimentation du Québec; des entreprises agricoles participantes : la ferme F.G. Proulx, la ferme Val-des-Bois, la ferme Jean-René et Jérôme Tourigny, et la ferme Sylvain Forcier; et de Pierre Audesse et l'équipe technique du laboratoire ISO 9002 de l'IRDA : Jacques Dion, Jacques Lizotte, Michel Lemieux, Martin Gagnon et Raynald Royer, IRDA.

Ce projet de recherche et de développement a été financé par le Fonds corporatif renouvelable des technologies de l'information du Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ).

Bibliographie

- Atherton, B.C., Morgan, M.T., Shearer, S.A., Stombaugh, T.S., et Ward, A.D. 1999. Site-specific farming : a perspective on information needs, benefits and limitations. *Journal of soil and water conservation*, vol. 54, p. 455-461.
- Brunelle, A., et Savoie, V. 2000. *Utilisation à la ferme des outils d'information géoréférencés en vue d'une optimisation des intrants et une diminution des pertes environnementales*. Rapport final, projet n° 24-810-255-04069. Entente auxiliaire Canada-Québec pour un environnement durable en agriculture. Ministère de l'agriculture des pêcheries et de l'alimentation, Nicolet, Qué. 46 p.
- Conseil des productions végétales du Québec. 1993. *Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux*. Commission des sols, section méthodologie. Agdex 533.
- Michaud, A.R., Landry, I., et Desmarais, C. 2000. Analyser et intégrer des données géomatiques sans perdre la carte. *1^{er} Colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision*. Conseil des productions végétales du Québec Inc. et Association québécoise de télédétection, 23 au 24 mars 2000, Saint-Hyacinthe, Qué. CPVQ Inc., Québec, Qué. p. 172-191.
- Microimages. 1999. Logiciel TNT-Mips, version 6.1. Microimages Inc., Lincoln, Nebr.
- Nolin, M.C., Forand, G., Simard, R.R., Cambouris, A.N., et Karam, A. 2000. Soil specific relationships between corn/soybean yield, soil quality indicators and climatic data. Dans *Proceedings of the fifth international conference on precision agriculture*. 16-19 July 2000, Bloomington, Minn. Sous la direction de P.C. Robert, R.H. Rust et W.E. Larson. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wis. CD-ROM. 16 p.
- Piekutowski, T. 2000. Traitements et integration des données géoréférencées pour l'agriculture de précision. *1^{er} Colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision*. Conseil des productions végétales du Québec Inc. et Association québécoise de télédétection, 23 au 24 mars 2000, Saint-Hyacinthe, Qué. CPVQ Inc., Québec, Qué. p. 194-208.
- Rivest, R. 2000. Agriculture de précision, des outils disponibles, mais les utilisateurs. *Conférence Agrivision Montérégie, Grandes cultures et commercialisation*. Cahier de conférences, Ministère de l'agriculture des pêcheries et de l'alimentation, Saint-Hyacinthe, Qué. p. 2-5.
- Rivest, R., et Gosselin, S. 2002. Mesures de précision du relief pour la gestion du sol et de l'eau. Dans *Lake Champlain in the new millenium, 2002 Spring Symposium*. Lake Champlain Research Consortium, Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec. pp. 46-47.
- Sadler, E.J., Busscher, W.J., Bauer, P.J., et Karlen, D.L. 1998. Spatial scale requirements for precision farming: a case-study in the southeastern U.S.A. *Agronomy Journal*, vol. 90, p. 191-197.
- Shumway, R.H., et Stoffer, D.S. 2000. *Time series analysis and its applications*. Springer texts in statistics. Springer-Verlag, New York. 549 p.
- Statistical analysis system. 2000. *SAS/STAT software and user's guide*. SAS Institute Inc., Cary, N.C.
- Tremblay, R. 1999. *Comparaison des techniques spectrales, modèle mixte et régressions classiques dans l'étude de données bivariées échantillonnées en transect*. Thèse de Maîtrise. Département de mathématiques et statistiques, Université Laval, Qué.