Université du Québec INRS Eau Terre Environnement

COKRIEGAGE DE LA TEXTURE ET DU CONTENU EN MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS.

COMPARAISON DE L'INFORMATION SECONDAIRE APPORTÉE PAR UNE SONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE MULTIFRÉQUENCE ET UN SPECTROMÈTRE DE RAYONS GAMMA

Thèse présentée

Par

Hilda Maria Paucar - Munoz

Pour l'obtention du grade de Maître en sciences de la Terre.

Examinateur interne

Examinateur externe

Richard Martel, INRS – Eau Terre Environnement, Québec

Aubert Michaud, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

Marc Richer - LaFlèche, INRS –Eau Terre Environnement, Québec

Dr. Michel Nolin, Centre d'agriculture de Précision, Agriculture Canada, Québec

Directeur de recherche

Codirecteur de recherche

©Droits réservés de Hilda Maria Paucar Munoz, 2010.

Karas karas kuri kinki Alpata ashpi kuri kinki Kuikata chutay kuri kinki Karas karas kuri kinki

RÉSUMÉ

L'utilité d'un spectromètre à rayon gamma pour caractériser la granulométrie et le taux de matière organique des sols a été testée. Les erreurs d'estimation ont été comparées avec celles obtenues en utilisant une sonde de conductivité électrique. Les résultats montrent que les covariables construites avec les comptes totaux de rayonnement gamma et des comptes relatifs au pic induit par le potassium (⁴⁰K) augmentaient la précision des estimations des taux de matière organique d'environ 3.5%. La sonde de conductivité électrique multifréquence n'améliorait pas les estimations de ce paramètre, mais permettait de meilleures estimations des fractions d'argile, de limon et de sable dans les sols. Les spectromètres de rayon gamma et les sondes de conductivité électrique peuvent être utilisées conjointement pour fournir une information secondaire complémentaire qui améliore les cartographies des sols.

We tested the usefulness of a field gamma-ray spectrometer to map soil organic matter content and grain size. Estimation errors were compared to those obtained with an electrical conductivity sensor. Results show that the derived covariate constructed from the total counts and the count related to potassium (⁴⁰K) spike increased the precision of the estimated soil organic matter content by about 3.5%. The multi-frequency electrical conductivity sensor did not improve the estimation of this soil parameter but it performed better than the gamma spectrometer for estimating clay, sand, and silt contents. Gamma-ray spectrometers and electrical conductivity sensors can be used simultaneously to provide complementary secondary information that increases the map quality.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier mon superviseur le Pr. Marc Richer-LaFlèche pour sa participation active au projet et pour m'avoir accordé tout à la fois confiance et liberté. J'aimerais remercier également mon codirecteur le Dr. Michel Nolin et le Dr. Jean-Christophe Aznar pour leurs conseils avisés et leurs aides précieuses.

Les examinateurs interne et externe, MM. Richard Martel et Aubert Michaud ont également permis grâce à leur relecture attentive d'enrichir ce manuscrit.

Je tiens à remercier l'ensemble des techniciens de l'INRS et d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, et en particulier M. Mario Deschênes. Ils m'ont épaulé dans la réalisation de ce travail.

Ce projet a été supporté financièrement par les fonds du Pr. Marc Richer-LaFlèche et par une subvention d'assitante de recherche du gouvernement fédéral du Canada.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	
REMERCIEMENTS	V
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XIII
1. INTRODUCTION	1
1.1. L'agriculture de précision : pourquoi ?	1
1.1.1. Transformations	1
1.1.2. Une nouvelle approche?	4
1.1.3. De nouveaux outils	5
1.2. Indicateurs de la fertilité des sols	9
1.2.1. Fertilité des sols	9
1.2.2. Texture	11
1.2.3. Structure	13
1.2.4. Critères physico-chimiques	15
1.2.5. Drainage	18
1.3. Mesures directes de la fertilité des sols	19
1.3.1. Méthode empirique	19
1.3.2. Instrumentation et mesures au champ	19
1.3.3. Analyses d'échantillons de sols	20
1.4. Mesures indirectes utilisées dans cette étude	22
1.4.1. Sélection de deux méthodes	
1.4.2. Conductivité électrique apparente	23
1.4.3. Radiométrie et spectrométrie gamma	29
1.4.4. Altitude	
1.5. Organisation du mémoire	38
1.5.1. Objectifs	
1.5.2. Mise en œuvre	
1.5.3. Organisation du mémoire	40
1.5.3. Organisation du mémoire 2. MATERIELS ET METHODES	40
1.5.3. Organisation du mémoire 2. MATERIELS ET METHODES 2.1. Zone d'Étude	

2.3. Topographie	47
2.4. Sols	48
2.5 Conductivité électrique	50
2.6. Radiométrie Gamma	57
2.7. Interpolation géostatistique	59
2.7.1. Traitements initiaux	59
2.7.2. Etude exploratoire de l'échantillon	61
2.7.3. Préparation des matrices de données	62
2.7.4. Modèles de corégionalisation	65
2.7.5. Interpolation	67
2.8. Nature compositionnelle des données	69
3. RESULTATS	71
4. DISCUSSIONS, CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	81
5. BIBLIOGRAPHIE	89
	99
DISTRIBUTION DES VARIABLES	99
ANNEXE 2	107
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2	107
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2 ANNEXE 3	107 115
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2 ANNEXE 3 ANALYSES MINÉRALOGIQUES	107 115 115
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2 ANNEXE 3 ANALYSES MINÉRALOGIQUES ANNEXE IV	107 115 115 121
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2 ANNEXE 3 ANALYSES MINÉRALOGIQUES PUBLICATION 1	107 115 115 121 121
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2 ANNEXE 3 ANALYSES MINÉRALOGIQUES ANNEXE IV PUBLICATION 1 SPATIAL INTERPOLATION OF SOIL CHARACTERISTICS USING GAMMA-RAY SPECTROMETER AND ELECTROMAGNETIC SENSOR DATA AS SECONDARY INFORMATION	107 115 115 121 121 123
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2 ANNEXE 3 ANALYSES MINÉRALOGIQUES ANNEXE IV PUBLICATION 1 SPATIAL INTERPOLATION OF SOIL CHARACTERISTICS USING GAMMA-RAY SPECTROMETER AND ELECTROMAGNETIC SENSOR DATA AS SECONDARY INFORMATION ABSTRACT	107 115 115 121 121 123 124
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2 ANNEXE 3 ANALYSES MINÉRALOGIQUES ANNEXE IV PUBLICATION 1 SPATIAL INTERPOLATION OF SOIL CHARACTERISTICS USING GAMMA-RAY SPECTROMETER AND ELECTROMAGNETIC SENSOR DATA AS SECONDARY INFORMATION ABSTRACT	107 115 121 121 121 123 124 125
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2 ANNEXE 3 ANALYSES MINÉRALOGIQUES ANNEXE IV PUBLICATION 1 SPATIAL INTERPOLATION OF SOIL CHARACTERISTICS USING GAMMA-RAY SPECTROMETER AND ELECTROMAGNETIC SENSOR DATA AS SECONDARY INFORMATION ABSTRACT 1. INTRODUCTION 2. METHODS	107 115 121 121 121 123 124 125 129
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2 ANNEXE 3	107 115 115 121 121 123 124 125 129 129
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2 ANNEXE 3 ANALYSES MINÉRALOGIQUES ANNEXE IV PUBLICATION 1 SPATIAL INTERPOLATION OF SOIL CHARACTERISTICS USING GAMMA-RAY SPECTROMETER AND ELECTROMAGNETIC SENSOR DATA AS SECONDARY INFORMATION ABSTRACT 1. INTRODUCTION 2. METHODS 2.1. Study area 2.2. Soil analysis	107 115 115 121 121 123 124 125 129 129 129
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2. ANNEXE 3 ANALYSES MINÉRALOGIQUES ANNEXE IV. PUBLICATION 1. SPATIAL INTERPOLATION OF SOIL CHARACTERISTICS USING GAMMA-RAY SPECTROMETER AND ELECTROMAGNETIC SENSOR DATA AS SECONDARY INFORMATION. ABSTRACT 1. INTRODUCTION. 2. METHODS 2.1. Study area. 2.2. Soil analysis 2.3. Sensors	107 115 121 121 121 123 123 123 129 129 129 129 130
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2. ANNEXE 3 ANALYSES MINÉRALOGIQUES ANNEXE IV PUBLICATION 1. SPATIAL INTERPOLATION OF SOIL CHARACTERISTICS USING GAMMA-RAY SPECTROMETER AND ELECTROMAGNETIC SENSOR DATA AS SECONDARY INFORMATION ABSTRACT 1. INTRODUCTION. 2. METHODS 2.1. Study area. 2.2. Soil analysis 2.3. Sensors 2.4. Primary and secondary information	107 115 115 121 121 123 123 123 125 129 129 129 130 131
RELATIONS ENTRE LA CHIMIE DU SOL ET LES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE OBTENUES AVEC LA SONDE GEM-2	107 115 115 121 121 123 123 123 123 129 129 129 130 131 133

3. RESULTS	137
4. DISCUSSION	139
ACKNOWLEDGEMENTS	141
REFERENCES	143
ANNEXE V	153
PUBLICATION 2	153
	161
AFFICHE PRÉSENTÉE LORS DU CONGRÈS ANNUEL DE L'ASSOCIATION QUÉBÉCOISE LES SPÉCIALISTES EN SCIENCES DU SOL (AQSSS) TENU À OKA DU 1 ^{ER} AU 3 JUIN 2010	161

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Échelle granulométrique utilisée pour définir la texture du sol	11
Tableau 2	Influence de quelques propriétés sur le taux de décomposition de la matière organique	16
Tableau 3	Plage d'acidité favorable aux cultures	17
Tableau 4	Ordre de grandeur de la conductivité électrique observée pour divers matériaux	26
Tableau 5	Principales caractéristiques des cinq séries de sols retrouvées dans les trois parcelles à l'étude	49
Tableau 6	Corrélations canoniques entre les variables principales, secondaires et les variables synthétiques (W1 et W2)	75
Tableau 7	Paramètres des variogrammes exponentiels	77
Tableau 8	Erreurs d'estimation associées aux valeurs interpolées des fractions granulométriques	78

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Manifestation autochtone en Équateur en 2008	1
Figure 2	Les phosphates utilisés massivement sur les parcelles agricoles favorisent la prolifération d'algues bleues	2
Figure 3	Sonde de conductivité électrique (Geonics) couplée à un GPS de haute précision	6
Figure 4	Système de guidage GPS monté à bord d'un tracteur	8
Figure 5	Pédogénèse	12
Figure 6	Influence du type d'argile sur la CEC	12
Figure 7	Structure des sols.	13
Figure 8	Composition moyenne d'un sol	14
Figure 9	Pourcentage d'eau contenue dans le sol selon la texture du sol	15
Figure 10	Au printemps, des zones mal drainées facilement identifiables peuvent apparaître clairement sur des photographies aériennes ou des images satellitaires.	18
Figure 11	Extracteur de la solution du sol, lysimètre à succion	19
Figure 12	Le prélèvement d'échantillons de sols et leur analyse en laboratoire sont généralement onéreux	21
Figure 13	Principe de l'induction électromagnétique	24
Figure 14	Levé radiométrique au sol	30
Figure 15	Cristal d'iodure de sodium dopé au thallium	32
Figure 16	Principe de fonctionnement du détecteur de rayons gamma utilisant un cristal d'iodure de sodium enrichi au thalium	33
Figure 17	Spectres typiques enregistrés par les détecteurs Nal(TI) pour le K (a), U (b) et Th (c)	34
Figure 18	Zone d'étude	44
Figure 19	Élevage du cochon en Beauce	45
Figure 20	Parcelles étudiées	46
Figure 21	Modèle numérique de terrain (MNT)	47
Figure 22	Carte pédologique détaillée des trois parcelles étudiées	48
Figure 23	Sonde d'induction électromagnétique multifréquences GEM-2 (Geophex Ltd).	50
Figure 24	Dispositif utilisé dans cette étude pour les relevés de conductivité électrique par induction électromagnétique	51
Figure 25	Facteurs pouvant venir affecter la profondeur d'investigation d'une sonde d'induction électromagnétique	52

Figure 26	Profondeur d'investigation en fonction de la fréquence d'induction électromagnétique	53
Figure 27	Radiomètre gamma RS700.	57
Figure 28	Enregistrement des données du radiomètre gamma	58
Figure 29	Dispositif de mesure d'émission de rayons gamma en mode d'acquisition	58
Figure 30	Dérive et erreurs résiduelles de la longitude enregistrée par une station de base GPS	60
Figure 31	Grille de points à estimer.	63
Figure 32	Matrices utilisées pour l'interpolation géostatistique	65
Figure 33	Transect retenu pour l'observation de la stationnarité des variables	72
Figure 34	Variation de l'altitude le long du transect d'observation de la stationnarité.	73
Figure 35	Variation de la pente le long du transect d'observation de la stationnarité.	73
Figure 36	Valeur de la première composante principale le long du transect	74
Figure 37	Cartographie numérique du taux de matière organique dans les sols selon différentes méthodes d'interpolation.	79

1. Introduction

1.1. L'agriculture de précision : pourquoi ?

1.1.1. Transformations

Les campagnes ont été radicalement transformées au lendemain de la seconde guerre mondiale en Europe et dès 1930 au Canada et aux Etats-Unis. Des progrès technologiques sont venus accompagner une productivité accrue résultant en de nouvelles méthodes de culture généralisant l'emploi de fertilisants et pesticides (Cleaver 1972). On assiste alors à une apparition de nouvelles cultures comme le maïs hybride. L'élevage devient industriel et rationalisé. Ces transformations sont favorisées par l'intensification du financement aux exploitations agricoles. Les fondements de l'agriculture moderne sont désormais de maximiser les rendements et les profits (Mollard 2003).



Figure 1 Manifestation autochtone en Équateur en 2008. Les subventions agricoles dans les pays occidentaux et la mondialisation des échanges acculent à la famine les paysans des autres pays pratiquant une agriculture traditionnelle respectueuse de l'environnement.

Soixante ans plus tard, l'enthousiasme est retombé. Le 24 juillet 2008 à Rome, une centaine de délégués de 36 pays, réunis à la FAO, ont invité les agriculteurs à adhérer à une agriculture "plus verte" ou agriculture de conservation. L'intérêt de plus en plus marqué des pays occidentaux pour les techniques de production alternatives va de pair avec le constat de l'impact négatif de l'agriculture moderne sur l'environnement et la santé (Fisher *et al.* 2000, McLaughlin et Mineau 2000) et dans une moindre mesure de la destruction des tissus ruraux des pays victimes d'importations massives de produits agricoles subventionnés (Fig.1).



Figure 2 Les phosphates utilisés massivement sur les parcelles agricoles favorisent la prolifération d'algues bleues (source: Gouvernement du Québec, MAPAQ, 2008).

On retrouve la même évolution au Québec et les mêmes motivations. La commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire conclue son rapport de 2008 par: «Les producteurs et productrices agricoles, doivent définitivement prendre le virage du développement durable...» (MAPAQ 2008). Cette commission a été formée suite à divers mouvements citoyens opposés aux nuisances agricoles (Fig. 2). On est loin du manuel de gestion des fertilisants québécois où il est écrit à propos des fumiers, lisiers et purins que : «leur usage fréquent aide à réduire la dégradation des propriétés physiques et biologiques des sols» (CRAAQ, 2000). L'utilisation abusive des produits chimiques a provoqué la pollution des sols, la modification des écosystèmes et la contamination de toute la chaîne alimentaire. Les exemples des dérives de l'agriculture intensive et des pratiques qui s'y rattachent sont nombreux. On peut citer le cas de l'encéphalopathie spongiforme bovine appelée aussi maladie de la vache folle. Elle est née de la consommation par le bétail de farines fabriquées à partir de carcasses d'animaux. Actuellement, l'agriculture nord-américaine utilise massivement des organismes génétiquement modifiés bien que les conséquences possibles de ces manipulations du vivant ne soient pas exactement connues.

A l'opposé, l'agriculture se voit assigner de nouveaux objectifs qui ne sont plus nécessairement la maximisation des productions mais par exemple une gestion de l'espace rural. On parle désormais de multifonctionnalité et d'agriculture «durable» (Mollard 2003, Lichtfouse *et al.* 2009). Cette évolution souhaitée des pratiques intervient au moment où les prix des produits agricoles ont atteint ou dépassé des niveaux record. Les perturbations climatiques sont en partie responsables de cette hausse mais surtout l'augmentation de la demande (FAO 2008). L'utilisation des céréales pour la production de biocarburants ne fait que renforcer cette tendance. A l'opposé de la demande sociale observable dans les pays industrialisés, la forte demande invitent à maximiser les productions. L'agriculture de demain pour assurer sa durabilité, devra donc faire face à un double enjeu. Elle devra garantir tout à la foi les besoins alimentaires des populations mais aussi leurs environnements (Sandor et Eash 1991).

Les recommandations d'origines diverses orientent les agriculteurs des pays industrialisés vers l'évolution de leurs pratiques plus que vers des changements radicaux toujours plus difficiles à mettre en œuvre. Jusqu'à présent, le choix de favoriser la rentabilité économique des exploitations n'est pas remis en cause.

3

1.1.2. Une nouvelle approche?



Ces nouveaux objectifs sont aussi ceux de l'agriculture de précision. Réduire les nuisances environnementales liées aux techniques d'agriculture intensive sans diminuer la productivité nécessite une gestion agronomique plus précise des relations entre les plantes cultivées, le sol et les interventions (Corwin et Lesch 2003, Johnson et al. 2005). L'agriculture de précision peut de ce fait être considérée comme la meilleure pratique agronomique pour le futur à cause de ses deux objectifs qui sont de maximiser les revenus économiques tout en minimisant les impacts environnementaux (Viscarra Rossel et McBratney 1998). Des scénarios alternatifs de gestion de l'exploitation peuvent être élaborés si l'on parvient à appréhender les variabilités spatiales et temporelles des caractéristiques des sols à l'intérieur des parcelles agricoles. La perception de discontinuités spatiales sur les terres agricoles ouvre la voie à une gestion raisonnée des intrants, des pesticides et des fongicides. Ce mode de production nécessite un suivi systématique des cultures et des sols, afin de limiter l'usage des engrais et des produits phytosanitaires au strict nécessaire. Mais il n'impose pas, comme l'agriculture biologique, l'exclusion de tout traitement chimique de synthèse et la transformation complète du mode de production (Brummer 1998)

Les médias se font souvent le relais de l'idée communément admise que l'agriculture de précision est une approche «moderne» et relativement récente. Sur une échelle de temps plus large que la décennie, c'est au contraire l'idée de continuité qui est plutôt récente. Les agriculteurs non ou partiellement mécanisées travaillent à une échelle spatiale différente, sur des parcelles de moins de 1ha, depuis le pléistocène (Stothert *et al.* 2003). Les interventions sont souvent décidées en fonction des variabilités intraparcellaires (Encart 1).

On note, de plus, une demande croissante de la part des gestionnaires des espaces agricoles (administrations et producteurs) pour la mise en œuvre de méthodes efficaces de cartographie des propriétés des sols à une haute résolution afin de permettre une gestion durable des exploitations (Tunstall 1998). Les mesures indirectes sont particulièrement appropriées pour couvrir à moindre frais de vastes territoires agricoles de plusieurs dizaines voire centaines d'hectares (Freeland *et al.* 1998).

L'intérêt des mesures indirectes est en définitive assujetti à la qualité des relations qui peuvent être établies entre les mesures directes et indirectes ainsi que par la densité spatiale des informations collectées (Christensen et Sorensen 1998). Une forte densité de mesure est en effet primordiale pour rendre compte et interpréter toute la complexité des hétérogénéités spatiales observées sur les terres agricoles (Dahlin et Loke 1998).

1.1.3. De nouveaux outils

Si la démarche n'est pas nouvelle, les outils utilisés eux le sont (Fig. 3). L'émergence de l'agriculture de précision est en effet étroitement associée aux développements des systèmes de positionnement par satellite (GPS) ainsi que des techniques de prospection géophysique de surface qui permettent une évaluation des caractéristiques physiques des sols à des niveaux spatiaux allant du mètre au centimètre et en trois dimensions (Corwin et Lesch 2003). La précision des GPS moderne est telle qu'il est possible de travailler les parcelles agricoles à l'aide de machineries entièrement automatisées (Vougioukas *et al.* 2006). D'autre part, l'engouement pour ces approches provient du constat que les variabilités, à l'échelle des parcelles agricoles, des variables secondaires, comme la conductivité électrique, sont souvent reliées au rendement des cultures (Zanolin 2003).

5



Figure 3 Sonde de conductivité électrique (Geonics) couplée à un GPS de haute précision (Source: Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique).

Des approches indirectes de modélisation hydrologique reposant sur la compréhension mathématique fine du mouvement des fluides et des éléments chimiques dans les parcelles sont actuellement en développement (Larry et Henry 2006). Ces modèles apportent une plus-value indéniable quant à la compréhension du fonctionnement d'ensemble du système. Une fois le modèle établi et sa robustesse testée, il est possible d'évaluer différents scénarios d'exploitation (simulations) et donc de mesurer les coûts et bénéfices des décisions agronomigues qui seraient prises. Cet outil séduisant se heurte toutefois à l'énergie nécessaire pour le mettre en œuvre. La précision de leurs prédictions est contrebalancée par la difficulté de leur établissement ou de leur calibration à l'échelle de parcelles agricoles. Dans les faits, ils ne sont pas utilisés de manière systématique, mais ils sont réservés aux fins de recherche pour le moment. Selon certains auteurs, l'hydropédologie, actuellement en plein essor, est d'ailleurs en passe de transformer la démarche de la pédologie traditionnelle (Larry et Henry 2006). La simple description est remplacée par une compréhension. Cantonnée autrefois dans le champ disciplinaire des sciences de l'environnement ou de l'agriculture, l'étude du système sol appartient désormais à un ensemble plus large rattaché aux bio ou aux géosciences.

Encart 2. Une cartographie des sols «en cinq minutes»



John Deere AgriServices proposait en 2006 un outil de caractérisation de la variabilité intraparcellaire par la réalisation d'une cartographie des sols en temps réel. En premier lieu, un quad équipé d'un système GPS de précision va recueillir les informations topographiques de la zone. A l'arrière, un conductimètre mesure la conductivité à l'horizontale et à la verticale et produit une carte de variation des sols. Pour la seconde phase, une sonde pédologique va explorer le sol aux points désignés par le logiciel. Le traitement des données des capteurs permet la réalisation de cartes en trois dimensions des caractéristiques physiques des sols (pourcentages d'argile, de limon et de sable, capacité de rétention en eau, compaction...), à des profondeurs différentes, jusqu'à 1m40 (source SADEF, France).

A l'heure actuelle, les outils de mesure géophysiques de surface constituent une bonne alternative à ces procédés. Les précisions obtenues par des appareils portables les destinent de plus en plus à être utilisés dans d'autres domaines que ceux où ils sont généralement cantonnés. Ils offrent la possibilité de répéter des mesures semi-directes dans le temps et dans l'espace à un coût abordable comparé aux analyses chimiques et granulométriques. La force de ces techniques réside dans l'acquisition couplée de signaux recueillis par les diverses sondes et de la localisation des mesures effectuées au moyen de GPS. Les signaux recueillis par les sondes doivent être calibrés pour

7

obtenir les paramètres souhaités et donc une incertitude inhérente aux techniques de mesure indirecte persiste. Cependant, ces outils sont l'objet d'un fort développement technologique et les incertitudes tendent à se réduire considérablement (Moran *et al.* 2003).

Les développeurs de ces nouvelles technologies ciblent essentiellement les grandes exploitations agricoles capables d'amortir rapidement les coûts d'acquisition de ces nouveaux investissements (Encart 2). Une des principales limitations des techniques utilisées en agriculture de précision est de pouvoir accéder en temps réel aux caractéristiques fondamentales des sols (Adamchuk *et al.* 2004). Les méthodologies utilisant des analyses en laboratoire visent plutôt une cartographie différée dans le temps. En attendant les nouvelles avancées technologiques, les efforts portent sur l'automatisation des tâches, avec un appareillage de positionnement GPS installé sur les machines agricoles (Fig. 4).



Figure 4 Système de guidage GPS monté à bord d'un tracteur (source: page personnelle du Dr. J. Mass, Université du Texas).

Une approche alternative est cependant envisageable. Il est possible de procéder à une caractérisation des parcelles agricoles afin de cartographier des entités spatiales de mêmes caractéristiques où on appliquera ensuite une gestion spécifique (Johnson *et al.* 2001, Cambouris *et al.* 2006, Molin et de Castro 2008). Cette méthodologie peut s'adapter aux petites et moyennes exploitations de quelques dizaines d'hectares. Les

mesures peuvent être effectuées par un tiers, une administration agronomique, une coopérative, ou un bureau d'étude privé. Le nombre de mesures directes effectuées sur des échantillons de sol est limité. Les échantillons ne sont pas prélevés aléatoirement, mais au contraire choisis pour couvrir les grands ensembles définis précédemment (Lesch 2005).

Auparavant, la cartographie géophysique des sols était basée sur une seule variable auxiliaire, soit la conductivité électrique apparente ou la résistivité électrique. Plus, récemment, il a été proposé d'en intégrer plusieurs. Un problème inhérent à l'utilisation de mesures indirectes est d'établir des relations entre ces mesures et les variables pédologiques d'intérêt qui intéressent l'agronome. Ces relations ne sont pas toujours aisées à établir du fait de l'interaction de nombreux autres facteurs comme la variation du taux d'humidité (Rhoades et al. 1977). Des mesures complémentaires permettent en effet d'obtenir un plus grand nombre de relations empiriques entre les propriétés des sols et la mesure indirecte, mais aussi de combiner ces mesures pour catégoriser les sols. Cette dernière approche a été retenue pour produire une cartographie du pH et de la texture des sols agricoles (Wong et al. 2008). Les mesures de conductivité électrique seules ne permettent souvent pas de distinguer les différents types des sols. Les mesures spectrométriques du rayonnement gamma ont permis une classification multicritère plus précise. Les auteurs de la publication citée ci-dessus ont privilégié une catégorisation des sols en fonction de l'amplitude des valeurs de conductivité électrique et de rayonnement gamma. Une analyse regroupant l'ensemble des données géophysiques serait également souhaitable.

1.2. Indicateurs de la fertilité des sols

1.2.1. Fertilité des sols

La gestion des fertilisants est un des problèmes majeurs de l'agriculture dans les pays industrialisés (Hart *et al.* 2004). La disponibilité naturelle en azote (N), en phosphore (P), et en potassium (K) limite la croissance des plantes. Pour pallier aux insuffisances et compenser les pertes par exportation (récolte ou drainage), la fertilisation procède par des ajouts massifs de fertilisants. Lorsqu'ils sont introduits en excès par rapport aux capacités de rétention des sols, ils ne sont plus retenus et sont

exportés avec les eaux de ruissellement ou de percolation. Ils sont alors à l'origine nombreux problèmes environnementaux (contaminations des nappes de phréatiques, eutrophisation des lacs, etc...). Au québec, l'utilisation de fertilisants est un acte agronomique exclusif qui est établi selon des règles strictes et un suivi devrait donc agro environnemental régulier (PAEF). L'agronome pouvoir recommander les quantités appropriées et par conséquent il ne devrait pas y avoir de problème environnemental. Ce n'est pourtant pas ce qui est observé, les cas de contamination des eaux de surface par exemple sont très nombreux. Pour le bassin versant de la rivière Yamaska en 1997, il est noté sur le site du MDDEP (http://www.mddep.gouv.gc.ca/milieu agri/pratigues-agri/yamaska/gualite.htm) que : « Pour les sous-bassins des rivières Yamaska, Yamaska Nord et Noire, notamment, la mauvaise qualité de l'eau est surtout liée à l'agriculture ». Le lecteur pourra se reporter à la section intitulée « modifier nos pratigues agricoles... la priorité » pour plus de détails.

La dynamique des nutriments dans les sols doit prendre en compte la richesse des sols, les importations (fertilisation et amendements) et les départs, par exportation des productions agricoles ou par pertes environnementales (lessivage des nutriments par les pluies,...). Leurs disponibilités pour les cultures ou leur départ dépendent, en grande partie, des caractéristiques intrinsèques du système, c'est-à-dire sous l'hypothèse d'un climat constant et des caractéristiques des sols (Godwin et Miller 2003). Par exemple, la rétention des nitrates dans les sols est reliée à de nombreuses variables physicochimiques comme la texture, la structure, et les diverses formes de matière organique, mais aussi à l'activité bactérienne.

Afin de calculer les apports nécessaires à la croissance des cultures et pour compenser les prélèvements et les pertes, les agronomes se basent sur une série de critères qui définissent la fertilité des sols et/ou leurs vocations: la richesse en éléments nutritifs, la texture, la teneur en matière organique, la capacité de fixation du phosphore, la physicochimie et le drainage. L'objet de l'agriculture de précision est justement de chercher à cartographier ces indicateurs à partir de variables auxiliaires faciles à mesurer.

1.2.2. Texture

La texture détermine en partie le potentiel agricole d'un sol. Elle peut être appréciée sur une base granulométrique (Tab. 1).

Nom de la fraction	Diamètre (mm)
Sable très grossier	De 2,0 à 1,0
Sable grossier	De 1,0 à 0,5
Sable moyen	De 0,5 à 0,25
Sable fin	De 0,25 à 0,10
Sable très fin	De 0,10 à 0,05
Limon (silt)	De 0,05 à 0,002
Argile	≤0,002
Argile fine	≤0,0002

Tableau 1 Échelle granulométrique utilisée pour définir la texture du sol

(source : http://sis.agr.gc.ca/siscan/taxa/cssc3/chpt17.html)

La texture des sols dépend de la géologie et de la pédogénèse ; c'est-à-dire de l'altération des roches mères ou des dépôts quaternaires en fonction du temps sous l'influence de facteurs externes climatiques et hydropédologiques ou internes, comme l'instabilité des roches placées dans des conditions de pression et températures différentes de celles où elles se sont formées (Fig. 5).



Figure 5 Pédogénèse. La variabilité spatiale de la composition des sols provient d'une part, de la variabilité des conditions qui président à la décomposition du matériel parent et à la formation des minéraux hérités, transformés ou néoformés. D'autre part, des processus sédimentaires et géomorphologiques contrôlent la distribution spatial des dépôts glaciaires, des alluvions, etc...

Le type de minéraux et notamment le type d'argile, permettent de déterminer la quantité de cations qui peuvent être libérés dans l'eau interstitielle du sol et donc être absorbés par les plantes ou transportés vers les eaux de surface et les nappes phréatiques. La capacité d'échange cationique (CEC) est fonction, entre autre, des charges électriques des minéraux (Fig. 6). Ces charges sont de plus fortement influencées par les variations de pH des eaux de percolation.



Figure 6 Influence du type d'argile sur la CEC (source: Université de Poitiers, France. http://hydrasa.labo.univ-poitiers.fr).

Un sol lourd (argileux) retient plus d'eau. Il est naturellement plus riche, mais est plus sensible à la compaction et donc mécaniquement plus difficile à travailler. D'un autre côté, un sol léger se réchauffe rapidement, s'égoutte plus facilement, est plus sensible à la sécheresse et à l'acidification et sa CEC est normalement nettement inférieure.

1.2.3. Structure

La structure du sol est également un paramètre important. Les particules du sol s'agglutinent les unes aux autres pour former des agrégats, donnant au sol sa structure (Fig. 7).

Les sols argileux, pauvres en calcium et ayant une activité biologique réduite reliée à une mauvaise aération ou une saturation en eau, possèdent une structure défavorable aux cultures. Visuellement, le sol apparaît comme humide, collant et massif. Il présente de grosses mottes angulaires lorsqu'il est brisé. Au contraire, un sol bien structuré est constitué d'une multitude de petits agrégats. Un sol caractérisé par une mauvaise structure sera plus sensible à la compaction et aura tendance à durcir en surface.



Figure 7 Structure des sols. Le type de particules qui constituent le sol et leurs agrégations déterminent la macroporosité. L'arrangement des vides contrôle la circulation des fluides et la proportion relative d'air et d'eau. La faune du sol a une importance primordiale dans la création et le maintien de la structure des sols (source: Caner, 2008. Université de Poitiers, France. http://hydrasa.labo.univ-poitiers.fr).



Figure 8 Composition moyenne d'un sol. Les êtres vivants sont contenus dans la fraction organique (Robert 1996).

L'eau et l'air sont les deux éléments dont les racines et les micro-organismes du sol ont le plus besoin. La structure a un impact direct sur la productivité du sol puisqu'elle facilite la circulation de ces deux éléments. La structure d'un sol détermine l'équilibre entre la fraction d'air et d'eau (Fig. 8). La porosité favorise la pénétration des racines et stimule l'activité microbienne en augmentant la surface de contact entre le sol et les racines. La porosité permet, en plus, d'optimiser l'efficacité des engrais minéraux et organiques. Si l'équilibre entre l'air et l'eau n'est plus maintenu, l'aération devient déficiente, ce qui crée un ensemble de conditions défavorables à la croissance des plantes.



Figure 9 Pourcentage d'eau contenue dans le sol selon la texture du sol (Duchaufour 1997).

La force capillaire entre les grains et la tension superficielle du film d'eau autour des grains déterminent un potentiel de matrice qui tend à retenir l'eau. Ce paramètre peut être mesuré à l'aide d'un tensiomètre. La succion du sol dépend de sa texture, de la taille des pores et de la quantité d'eau contenue dans les pores par rapport à la quantité maximale absorbée (Fig. 9). La force augmente lorsque le diamètre des pores se réduit et lorsque la proportion d'eau diminue. Lorsque les forces de rétention de l'eau sont trop importantes pour les plantes, celles-ci se voient privées de toute capacité d'absorption d'eau et de nutriments. On atteint alors le point de flétrissement (Rowell 1994).

La structure du sol peut être altérée par un travail du sol trop intensif ou lorsque des équipements trop lourds circulent dans les parcelles en périodes de conditions humides (ex. printemps).

1.2.4. Critères physico-chimiques

Les propriétés physiques du sol (la texture, la structure, la conductivité hydraulique et le volume de percolation d'eau) conditionnent la chimie du sol et déterminent le cycle des minéraux. Ces paramètres sont tous interdépendants dans le système sol. Par exemple,

une faible teneur en matière organique (moins de 3 %) ainsi qu'un pH trop acide ont généralement des effets négatifs sur la structure du sol. L'équilibre entre les propriétés physiques, biologiques et chimiques détermine la fertilité d'un sol (Soltner 2002).

Paramètre	Sens de la	Valeur optimum	
	relation		
Taux d'argile	Négatif		
Carbonates	Négatif		
pH	Positif	7	
Température	Positif	30 °C	

Tableau 2 Influence de quelques propriétés sur le taux de décomposition de la matière organique.

Les fumiers et les résidus de culture enfouis, de même que l'humus du sol contiennent des éléments chimiques comme l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, et constituent une réserve d'éléments nutritifs. Les bactéries et les champignons transforment ces composés organiques en éléments minéraux assimilables par les racines. Ce processus biologique appelé minéralisation remet en circulation des minéraux qui satisfont les besoins des cultures. L'aération, l'humidité et la température du sol influencent la vitesse et l'intensité du processus de décomposition de la matière organique (Tab. 2). La matière organique retient les éléments et limite les risques de lessivage. Le complexe argilo-humique possède en effet des propriétés permettant de retenir les minéraux à la surface des agrégats en plus ou moins grandes concentrations. Si les minéraux ne sont pas adsorbés ou fixés à la matière organique, ils peuvent être entraînés avec l'eau de drainage ou être lessivés en profondeur. Les éléments peuvent alors être entraînés dans les nappes phréatiques et les cours d'eau.

En dessous de 3 %, la proportion de matière organique est généralement considérée comme insuffisante et on juge que le sol est appauvri en matière organique (Soltner 2002). Au contraire, une accumulation importante de matière organique peut être un symptôme d'une faible activité biologique, relié à un drainage déficient, à l'acidité ou à la compaction (Tab. 2).

Les équilibres chimiques dans la solution du sol sont contrôlés par des équations d'oxydoréduction et par des réactions acide-base. Dans ces équations, la concentration en ions H⁺ (le pH) détermine la proportion des différentes formes des éléments (spéciation). Le pH influe directement sur la CEC. C'est donc un paramètre agronomique clef. Par exemple, quand le pH est inférieur à 6, la disponibilité de certains minéraux bénéfiques pour les plantes, comme le phosphore, est réduite. Dans ces mêmes conditions, les formes toxiques de l'aluminium (Al₂O₃) augmentent.

Au Québec, les sols glaciaires podzoliques sont généralement acides. Une des conséquences de la présence excessive d'ions H⁺ est de ralentir l'activité microbienne. Par exemple, les bactéries fixatrices d'azote travaillent mieux à des pH avoisinants 6,5. Dans ces conditions acidifiantes, la décomposition de la matière organique et la minéralisation diminuent.

Certaines cultures supportent difficilement des conditions trop acides. C'est le cas de la luzerne ou du soya (Tab. 3). De plus, les fertilisants organiques ou minéraux ainsi que le prélèvement du calcium et du magnésium par les plantes contribuent à l'augmentation de l'acidité des sols. L'application de chaux tend à modifier à la hausse les valeurs de pH et à rétablir un niveau d'acidité jugé optimal pour le développement des plantes.

Tableau 3 Plage d'acidité favorable aux cultures (source: site internet du Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario.



http://www.omafra.gov.on.ca/french/environment/soil/chemical.htm).

1.2.5. Drainage



Figure 10 Au printemps, des zones mal drainées facilement identifiables peuvent apparaître clairement sur des photographies aériennes ou des images satellitaires. Elles sont généralement reliées aux dépressions topographiques (source : Centre de conservation des sols et de l'eau de l'est du Canada).

Une zone de mauvais rendement dans un champ est souvent reliée à un mauvais drainage du sol (Fig. 10). Le drainage est souvent relié à la microtopographie et de mauvaises conditions de drainage sont fréquemment observées dans des dépressions (Pan *et al.* 2004). Elles collectent les eaux de ruissellement et se drainent moins vite du fait de leurs pentes nulles. Pour prédire la présence de zones humides ou définir une variable de drainage, on emploie des indices comme le rapport entre la surface drainée en amont et la pente ou la courbure (dépressions) des sols (Chaplot *et al.* 2000, Feifei *et al.* 2004, Jennes 2006).

1.3. Mesures directes de la fertilité des sols

1.3.1. Méthode empirique

L'agriculteur a pendant longtemps basé ses interventions sur des connaissances empiriques obtenues par l'observation de ses cultures (Corwin et Lesch 2003). C'est un lieu commun de préciser que les civilisations anciennes ont obtenu des résultats étonnants basés sur l'observation et le principe d'essai-erreur. Plus proches de nous, les agriculteurs et agricultrices biologiques du Québec sont à la base d'une innovation intense et quotidienne. Ils utilisent des savoirs anciens et nouveaux basés sur des connaissances scientifiques, mais élaborent aussi leurs propres savoirs par la pratique, l'expérience, l'observation, et l'essai-erreur (Richardson 2005).

1.3.2. Instrumentation et mesures au champ

Les mesures à l'aide d'instrumentations spécialisées sont venues compléter les observations souvent qualitatives. Des mesures au champ peuvent être réalisées en installant des dispositifs spécifiques sur les parcelles. Un exemple de cette approche est l'utilisation de bougies poreuses (lysimètre à succion). Cette méthode est utilisée pour mesurer des paramètres fondamentaux reliés à la dynamique des éléments fertilisants dans le sol et consiste à extraire les solutions du sol au moyen de tubes reliés à des céramiques poreuses (Fig. 11).



Figure 11 Extracteur de la solution du sol, lysimètre à succion (d'après Corwin et Lesch 2003).

Un vide partiel est créé à l'intérieur des bougies par une chambre. La solution du sol est extraite par succion et transite par des tubulures pour être finalement recueillie dans des contenants. Les solutions sont par la suite analysées au laboratoire.

Les mesures effectuées avec les lysimètres à succion ont été critiquées sur la base du fait que les solutions recueillies n'étaient pas représentatives de la composition des solutions du sol (Smith *et al.* 1990). Ces dispositifs sont installés sur les parcelles en quelques points précis uniquement. Ceci du fait de la lourdeur de mise en place des dispositifs, mais aussi en raison du coût financier des analyses chimiques subséquentes. Ils ne peuvent donc pas fournir une image précise des variabilités spatiales que l'on rencontre sur les parcelles (Corwin et Lesch 2003). A l'échelle spatiale du point d'échantillonnage, les solutions prélevées sont celles qui sont présentes autour des bougies (Hart et Lowery 1997). Dans le cas où les sols présentent de fortes hétérogénéités, les mesures obtenues sont difficilement extrapolables à l'ensemble du site d'échantillonnage et encore moins à la parcelle dans son ensemble (Corwin et Lesch 2003).

1.3.3. Analyses d'échantillons de sols

L'alternative aux mesures au champ est de recueillir du matériel sur place et de l'analyser par la suite en laboratoire. L'analyse d'échantillons de sols est à la base du diagnostic agronomique. Les paramètres d'intérêt pour l'agronome sont connus directement avec une incertitude relativement faible comparée aux autres méthodes.

La relation entre ces mesures directes et les caractéristiques des sols peut être à la base de la construction d'indices de risques d'érosion ou de lessivage des phosphates. Leurs résolutions les destinent toutefois à des approches régionales (milliers d'hectares) plus qu'à celle de la parcelle (ha). De plus, le principe d'utilisation de ces indices n'est pas de rendre compte des phénomènes dynamiques, mais de proposer un patron figé de la rétention des éléments. Évaluer les risques de transfert des fertilisants vers les eaux de surface ou souterraines avec cette seule technique nécessiterait de répéter dans l'espace et le temps les analyses, et donc de procéder à l'analyse chimique d'un trop grand nombre d'échantillons.





Comme le souligne régulièrement les tenants de l'agriculture de précision, basée sur l'utilisation de mesures indirectes complémentaires, les mesures directes, limitées en nombre du fait de leur coût (Fig. 12), ne peuvent rendre compte avec une résolution suffisante des variabilités spatiales (Wong *et al.* 2008). La collecte d'échantillons et leur analyse postérieure peuvent offrir, par contre, une source d'étalonnage d'autres mesures indirectes. Ces points d'observations sont indispensables pour définir des relations empiriques entre les propriétés du sol et des mesures géophysiques comme la conductivité électrique apparente (Shaaban et Shaaban 2001).

1.4. Mesures indirectes utilisées dans cette étude

1.4.1. Sélection de deux méthodes

Plusieurs méthodes de détections géophysiques et géochimiques seraient potentiellement utilisables pour caractériser les sols de parcelles agricoles. Les mesures de résistivité électrique à l'aide d'électrodes en contact avec le sol sont certainement les premières à avoir été utilisées pour caractériser la salinité des sols (Corwin et Lesch 2003). L'intérêt des agronomes pour ce paramètre et la robustesse des méthodes ont certainement justifié ce choix.

Dans le cadre de cette étude, deux méthodes ont plus particulièrement retenu notre attention. Il s'agit des mesures de conductivité électrique par induction électromagnétique en domaine fréquentiel et de détection spectrométrique du rayonnement gamma. La première est largement répandue en agriculture de précision, alors que l'utilisation de la seconde est pour le moment confidentielle et restreinte à quelques équipes de recherche. Les avantages des levés de conductivité électrique par induction électromagnétiques sont nombreux. Ils sont rapides à mettre en œuvre notamment car ils ne nécessitent pas de mise en œuvre de dispositifs compliqués. Par conséquent, ces méthodes sont relativement abordables. Le contact entre le sol et l'instrumentation n'est pas nécessaire et les prospections peuvent être réalisées sur différents types de couverts végétaux ou de substrats et aussi en conditions hivernales. Toutefois, les récepteurs captent aussi les bruits environnementaux naturels et anthropiques comme ceux générés par les lignes haute-tension ou des objets métalliques enfouis dans le sol (conduites...) ce qui dans notre cas ne constitue pas une source de biais. Le rayonnement gamma peut potentiellement fournir une mesure complémentaire intégratrice des caractéristiques des sols, mais pourraient également permettre de détecter la dynamique des fertilisants, même si les spectromètres de rayon gamma sont des équipements plus dispendieux.
1.4.2. Conductivité électrique apparente

Historique

Les mesures de conductivité électrique apparente (CEA) ont été dans un premier temps utilisées dans les domaines de la recherche hydrogéologique, l'exploration des ressources minières et pour la cartographie géologique (Auken *et al.* 2006). De nombreuses autres applications ont été ajoutées plus récemment comme l'agriculture de précision (Corwin et Lesch 2005). Ce développement a bénéficié de ceux de champs disciplinaires connexes comme les systèmes d'information géographique et les statistiques spatiales (Corwin et Lesch 2005).

Principe de base

La conductivité électrique des sols dépend du déplacement des charges électriques présentes dans la solution, en périphérie des colloïdes et parfois des minéraux argileux. Dans le système sol, ces paramètres sont reliés à de nombreuses caractéristiques des sols comme décrit dans la section suivante. En géophysique, c'est généralement la variation des mesures dans l'espace qui est jugée indicatrice. En agriculture de précision, une tendance est d'établir plutôt des relations empiriques avec ces paramètres.

La conductivité électrique des sols peut être mesurée directement, par exemple en enfonçant des électrodes dans le sol (méthode de résistivité électrique) mais aussi indirectement en générant une onde électromagnétique et en recueillant les courants induits (méthodes d'induction électromagnétique).

Les appareils qui utilisent le principe d'induction électromagnétique en domaine fréquentiel sont composés d'une source (émetteur) et d'un récepteur. Une bobine source est traversée par un courant électrique alternatif et produit un champ magnétique oscillatoire, assimilable à une onde qui se propage dans l'espace. Lorsque cette onde rencontre un corps conducteur, elle induit un courant électrique secondaire, nommé courant de Foucault qui induit lui même un champ magnétique secondaire. Le champ magnétique total mesuré par le récepteur est composé des champs magnétiques primaire (en phase) et secondaire en quadrature (Fig. 13).





Les conductivimètres modernes permettent de subdiviser le signal en composantes en phase et en quadrature. La composante en quadrature est proportionnelle à la conductivité électrique des matériaux présents dans le sol. Il existe deux modes de mesure de la conductivité électrique apparente : l'induction électromagnétique en domaine fréquentiel (v.g. GEM2, EM31, EM34, PROMIS-10) et l'induction dans le domaine du temps (TDEM). Pour des raisons de logistique et de coût, l'induction en domaine fréquentiel est plus appropriée pour l'agronomie. De plus, le conductivimètre GEM-2 utilisé dans nos travaux est de plus multi-fréquences. Lorsque la fréquence d'induction diminue, le volume sur lequel est mesuré la conductivité électrique (et en particulier la profondeur) augmente.

Les données enregistrées par l'appareil de mesure sont des valeurs de conductivité électrique apparente, intégrées sur une certaine profondeur de sol. Si le milieu était homogène, les mesures pourraient être interprétées comme des conductivités électriques absolues, mais en réalité, le milieu est hétérogène et stratifié. Pour les levés FDEM, cette profondeur dépend de l'écartement entre l'émetteur et le récepteur, mais aussi de la fréquence de l'induction électromagnétique. Pour la sonde GEM-2, l'écartement entre l'émetteur et le récepteur est constant. L'utilisation de plusieurs fréquences simultanément permet théoriquement une investigation de la conductivité électrique à différentes profondeurs. En effet, la pseudo-profondeur d'investigation $\delta($ «skin depth») par induction électromagnétique est définie par :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu \omega}}$$

où σ est la conductivité électrique du médium, μ est la perméabilité magnétique et ω est la fréquence angulaire de l'onde plane. Sachant qu'on peut exprimer la fréquence angulaire en fonction de la fréquence (f en Hz) de l'onde utilisée: $\omega = 2\pi f$, la formule précédente peut se transformer en :

$$\delta = (1/\sigma\mu\pi f)^{1/2}$$

La profondeur d'investigation est donc inversement proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique utilisée.

Il faut noter toutefois que la profondeur réelle à laquelle pénètre l'onde peut être sensiblement différente de la pseudo-profondeur calculée avec la formule précédente. Un ensemble de facteurs viennent influencer cette relation. La configuration matérielle utilisée (fréquence d'induction, construction du système antenne-récepteur, ...), les caractéristiques des sols (contrastes de conductivité électrique des strates de sols, ...), des biais environnementaux (le bruit ambiant, la température ...) ou même les algorithmes utilisés pour traiter les données vont modifier cette profondeur (Huang 2005).

L'inversion des données permet théoriquement de reconstituer un modèle en deux ou trois dimensions des propriétés du sol (Auken *et al.* 2006). Une approche possible est de spécifier initialement la stratigraphie du sol (nombre de couches) à partir de connaissances établies préalablement. Par itérations successives, les algorithmes d'inversion vont rechercher à caler les données observées aux modèles théoriques. La qualité de la reconstitution finale dépend fortement des contrastes de conductivité électrique entre les différentes couches de sols et le matériel parental (Demanet *et al.* 2001).

Lorsque l'inversion est réalisée selon 2 axes principaux (sens de déplacement et profondeur) les reconstructions sont effectuées en 2 dimensions, leur juxtaposition produit des imageries nommées « pseudo 3D » car les variations transversales ne sont pas prises en compte spécifiquement. Le modèle de conductivité électrique inversée peut être de ce fait affecté par des erreurs. L'occurrence et l'amplitude des erreurs augmentent avec l'espacement des transects.

25

Relation entre la conductivité électrique et les propriétés des sols

Matériau	Conductivité électrique (mS/m)	
Air	0	
Eau distillée	0.01	
Eau fraiche	0.5	
Eau salée	3000	
Sable sec	0.01	
Sable saturée	0.1-1	
Calcaires	0.5-1	
Argiles	2-1000	
Granite	0.01-1	
Glace	0.01	

 Tableau 4 Ordre de grandeur de la conductivité électrique observée pour divers matériaux (source:

 Annan 1992).

La conductivité électrique varie selon la nature des matériaux (Tab. 4). Pour les sols, elle peut être considérée comme un proxy de la variabilité spatio-temporelle de nombreuses propriétés physiques du sol comme la texture, la fraction d'eau ou la composition des fluides (Samouelian *et al.* 2005).

Les mesures de conductivité électrique ont tout d'abord été reliées aux concentrations en ions de la solution du sol (Marion et Babcock 1976) ou à des paramètres liés comme la capacité d'échange cationique ou le pH (Sudduth *et al.* 2005, Vitharana *et al.* 2008). Les courants électriques dans les sols sont principalement électrolytiques. Ils sont basés sur le déplacement des ions dans les pores saturés en eau. Par conséquent, la conductivité dépend, entre autre, des concentrations en anions et cations présents dans les fluides en solution. Les valeurs mesurées sont donc plus grandes lorsque les concentrations en cations ou en anions augmentent dans la solution (Shea et Luthin 1961, Scollar *et al.* 1990). De ce fait, une application courante des techniques électromagnétiques de mesure de la conductivité électrique apparente est de caractériser la salinité des sols (Herrero *et al.* 2003, Amezketa 2007b, a). Par mesures répétées, il est possible de procéder au suivi et au devenir des éléments. Ceci permet d'étudier la dynamique des fertilisants par exemple (Eigenberg *et al.* 2002). L'épaisseur des sols est un autre paramètre potentiellement mesurable à partir de ces mesures (Sudduth *et al.* 2001).

La conductivité électrique est aussi fonction de la minéralogie et de la texture des sols (Besson *et al.* 2004, Samouelian *et al.* 2005). La nature des constituants solides qui composent les sols comme la taille des particules et leurs distributions vont influencer indirectement la circulation des ions dans les fluides et donc la conductivité électrique du sol (Hedley *et al.* 2004). Par exemple, le pH ou la conductivité électrique peuvent varier en fonction des teneurs en argile ou en matière organique (Jung *et al.* 2005, Lund *et al.* 2005). Il n'est donc pas surprenant que des auteurs aient pu établir des relations entre la texture du sol, sa composition et des mesures électromagnétiques de la conductivité électrique apparente (Brevik *et al.* 2006, McCutcheon *et al.* 2006). Les teneurs en argiles sont généralement relativement bien corrélées à ces mesures (Weller *et al.* 2007).

Cependant, il est parfois compliqué d'établir des relations directes entre la conductivité électrique et la texture des sols. Des sols de texture apparemment similaire peuvent présenter de forts contrastes de conductivité électrique du fait de la présence ou de l'absence de certains éléments. Par exemple, il a été montré que des sols sableux possédant de faibles proportions d'argile pouvaient présenter des valeurs de conductivité très différentes en fonction de l'agrégation des particules fines (Lamotte *et al.* 1994). Ces mêmes études montrent que les sols où les argiles structurées en microagrégats discontinus présentent souvent des valeurs de conductivité plus faibles que ceux où les argiles forment une enveloppe relativement continue autour des grains de quartz.

La géométrie des pores, la distribution des vides et leurs formes déterminent la proportion d'air et d'eau dans un sol. La conductivité électrique augmente avec la concentration en eau. Des relations linéaires empiriques ont d'ailleurs été établies entre la résistivité électrique (l'inverse de la conductivité) et la fraction d'eau contenue dans un sol (Tab. 4). Plus un sol est saturé en eau, ce qui est généralement le cas pour les sols mal drainées, plus sa conductivité électrique sera élevée. Ces propriétés ont été utilisées pour caractériser la porosité des sols à partir de levés d'induction électromagnétique aéroportés (Ley-Cooper *et al.* 2008) ou pour établir la profondeur de la nappe d'eau (McBride et Bober 1993, Schumann et Zaman 2003) ou encore pour juger du niveau de compaction (Petersen *et al.* 2005).

La conductivité électrique est étroitement reliée à la température qui contrôle la viscosité de l'eau (Scollar *et al.* 1990, Samouelian *et al.* 2005). L'agitation des ions augmente quand la température augmente et quand la viscosité du fluide diminue. La conductivité électrique augmente donc avec une hausse de la température. A l'extrême, des températures inférieures à zéro, la glace devient extrêmement résistive donc très faiblement conductrice. Pour comparer des valeurs de conductivité électrique recueillies dans des conditions différentes, il est donc nécessaire de les normaliser à une température standard. Des corrections peuvent être calculées pour exprimer la conductivité électrique à une température standardisée de 25° avec l'équation suivante valable pour les levés de très faibles pénétrations verticales, c'est-à-dire en surface des sols (étude de Campell 1948, cité dans Samouelian *et al.* 2005):

$$C_T = C_{25}(1 + k(T-25))$$

où C_T est la conductivité électrique à la température d'expérimentation à la surface du sol, C_{25} est la conductivité électrique à 25°C et k est un terme correctif égal à 2,02 %.

Par conséquent une connaissance de la variation saisonnière de la température et de ses conséquences sur les valeurs de conductivité électrique est essentielle pour éviter de mauvaises interprétations des mesures de terrain quand par exemple elles sont faites à la même place mais à différents moments (Brevik *et al.* 2006). Il est à noter que ces variations peuvent différer sensiblement en fonction de la texture des sols. Des auteurs ont par exemple démontré que les sols formés de matériaux grossiers ont des variations plus importantes que les sols argileux (Aaltonen 2001). Dans les études où l'impact de la température n'est pas corrigée, on considère que les variations de conductivité électrique reliées aux variations de températures sont négligeables (Bottraud *et al.* 1984). Cette hypothèse peut être justifiée lorsque les relevés sont effectués dans une courte période de temps pendant laquelle la température varie peu.

A ces sources de variation s'ajoutent les dérives instrumentales reliées non pas à la physico-chimie des sols, mais à l'électronique des sondes d'induction électromagnétique en relation avec la température également (Abdu *et al.* 2007). Pour s'affranchir d'une partie de ces erreurs, certains auteurs recommandent de placer les sondes à l'ombre

(Robinson *et al.* 2004). Les signaux bruts peuvent efficacement être filtrés pour s'affranchir de cette variabilité résiduelle difficile à contrôler notamment dans le cas de mesures clusterisées présentant des erreurs systématiques (Brenning *et al.* 2008). Si possible, il est conseillé de réaliser les levés le plus rapidement possible afin de limiter ces dérives (Wilson *et al.* 2005). Si l'on dispose de lignes perpendiculaires à l'orientation des transects principaux, des opérations d'ajustement par « levelling », comme pratiqué pour les données aéroportées peuvent permettre un bon nettoyage des données et éliminer les cartographies présentant l'aspect de tôles ondulées. Néanmoins il semble que ces variations sont relativement faibles par rapport aux variabilités des paramètres du sol (Allred *et al.* 2005). Certains auteurs suggèrent pourtant d'utiliser des stations de base (fixes) pour mesurer ces variations dans le temps.

1.4.3. Radiométrie et spectrométrie gamma

Historique

L'utilisation des rayons gamma est relativement nouvelle en agriculture de précision (Doolittle *et al.* 1994, Pracilio *et al.* 2006). Cette technologie a été développée pour réaliser des campagnes de prospections aéroportées à large échelle pour l'exploration minérale et pour détecter la présence de radio-élements (à proximité de centrales nucléaires par exemple). Une des premières utilisations des techniques de radiométrie concernait la localisation de dépôts de phosphates en Amérique du Nord et datent de 1963 (Bollo et Jacquemin 1963). Les dépôts de phosphates contiennent des éléments radioactifs (uranium) qui permettent leur détection par spectrométrie gamma.

Toutefois, l'information recueillie n'offrait pas nécessairement la résolution nécessaire pour des applications agricoles. L'information recueillie nécessitait des connaissances expertes pour pouvoir être utilisée. L'apparition de nouveaux équipements conçus spécifiquement pour réaliser des levés au sol à grande résolution, avec des interfaces simplifiées et un prétraitement des données devrait permettre de diffuser plus largement cette méthode (Fig. 14).



Figure 14 Levé radiométrique au sol. Les nouveaux équipements permettent d'envisager des cartographies au sol à de hautes résolutions au niveau du sol. Deux détecteurs à iodure de sodium sont fixés sur le toit de ce véhicule de tourisme (dispositif RS-700, RadioSolutions Inc).

La technologie radiométrique possède donc la capacité de fournir de nouvelles informations qui permettre une meilleure caractérisation des sols (Gourlay et Sparks 1996, Taylor *et al.* 2002, Rossel *et al.* 2007).

L'intérêt principal de l'étude du rayonnement gamma réside dans le fait que l'information recueillie n'est pas redondante par rapport à celle apportée par les mesures de conductivité électrique ou de résistivité électrique, mais est, au contraire, complémentaire. Bien que des auteurs aient noté que les différentes méthodes utilisées ne produisent pas forcément les mêmes valeurs de conductivité électrique (Allred *et al.* 2006), il n'est forcément efficace de combiner des mesures réalisées avec des sondes d'induction électromagnétique et des méthodes géoélectriques de mesures directes de la conductivité électrique. On mesure en effet dans les deux cas le même paramètre et les mesures obtenues sont souvent fortement corrélées. Le rayonnement gamma est au contraire un paramètre indépendant. Les approches de caractérisation multi-proxies sont donc envisageables.

Principes de base

Certains isotopes ont un noyau atomique instable possédant un surplus d'énergie et tendant à se désintégrer pour atteindre un état plus stable. Ce processus est accompagné par l'émission de particules ou d'énergie appelée radiation nucléaire. Il y a plusieurs types de désintégrations radioactives. La désintégration alpha est accompagnée par l'émission d'une particule alpha constituée de deux protons et de deux neutrons (noyau d'hélium). La désintégration bêta⁻ provient de l'émission d'une particule bêta identique à l'émission d'un neutron chargé négativement. La désintégration bêta⁺, qui est plus fréquente, est accompagnée par l'émission d'une particule chargée positivement. Les noyaux instables peuvent aussi rechercher un plus grand équilibre en émettant de l'énergie pure, sans matière, qui s'apparente à des ondes électromagnétiques. Ce sont les rayons gamma. Leur énergie est définie par leur fréquence, c'est-à-dire le nombre d'ondes par seconde. Chaque radionucléide émet des rayons gamma à des énergies spécifiques.

La détection de la radioactivité dans l'environnement se concentre surtout sur la détection des rayons gamma, notamment car ceux-ci sont les plus pénétrants et voyagent dans l'air sur de grandes distances. Il existe de nombreux types d'appareils pouvant mesurer les rayons gamma. Les premiers instruments ont été développés au début du XX^{ème} siècle et ont conduit au développement d'instruments portables. La sensibilité des appareils a augmenté rapidement pendant les années 1940. Les méthodes de détection reposent principalement sur les propriétés ionisantes des radiations gamma et utilisent des instruments qui convertissent les radiations en signaux électriques.

Les compteurs à scintillations sont les plus utilisés. Ils utilisent un monocristal inorganique d'iodure de sodium enrichi au thallium (Nal(TI)). L'énergie des rayons gamma incidents excitent les atomes d'iode contenus dans le cristal (Fig. 15).

31



Figure 15 Cristal d'iodure de sodium dopé au thallium. Un rayon gamma réagit avec l'une des molécules Nal pour produire des photons (source: Santé Canada, <u>http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/contaminants/radiation/surveill/sodium-fra.php</u>).

En revenant à leur état normal, ils émettent des photons visibles. Le TI est utilisé comme source d'enrichissement du Nal du fait qu'il contribue à accroître le nombre de photons visibles émis par le cristal et contribue aussi à améliorer la transparence du cristal aux photons émis afin qu'ils puissent être mesurés par la cellule photoélectrique. Les photons, piégés à l'intérieur du système atteignent le photomultiplicateur (ou photocathode) constitué d'une mince couche d'un alliage métallique alcalin. Il convertit les photons de scintillation en un signal électrique. Le nombre de photons comptés est proportionnel à l'énergie incidente. Ce signal est ensuite amplifié par une série de dynodes alimentées par une différence de potentiel croissante et finalement mesuré (Fig. 16).



Figure 16 Principe de fonctionnement du détecteur de rayons gamma utilisant un cristal d'iodure de sodium enrichi au thalium. Les rayonnements ionisants traversent le cristal qui réagit par l'émission de photons. Une plaque utilisant le principe photo-électrique transforme les photons en électrons. L'émission d'électrons est amplifiée par une série de dynodes alimentées par un voltage croissant. Le résultat de l'ensemble de la chaîne est l'émission d'un courant électrique proportionnel à l'énergie reçue par le scintillateur (Maher, 2006).

Le cristal et le photomultiplicateur sont regroupés dans un compartiment sec. Le cristal est en effet hygroscopique et s'opacifie sous l'effet de l'humidité diminuant le rendement du détecteur. L'étanchéité du système est donc nécessaire. L'ensemble du dispositif est isolé de la lumière ambiante qui pourrait venir perturber le signal. Le rendement du photomultiplicateur baisse théoriquement au cours du temps. Dans la pratique cette usure ne constitue pas un billet. Certains détecteurs sont encore en service après 20 ou 30 ans.

Les profils pédologiques contiennent naturellement des isotopes radioactifs qui se dégradent en émettant des rayonnements gamma (Cook *et al.*, 1996). L'essentiel des radiations est fourni par trois éléments: le potassium, l'uranium et le thorium. Leurs

abondances dans la croûte terrestre est de 2 à 2,5 %, 2 à 3ppm et de 8 à 12 ppm, respectivement. Les rayons gamma émis par chacun de ces isotopes radioactifs possèdent une «signature» spécifique. Chaque élément possède un spectre particulier avec des rehaussements pour certaines énergies (Fig. 17).



Figure 17 Spectres typiques enregistrés par les détecteurs Nal(TI) pour le K (a), U (b) et Th (c) (Erdi-Krausz *et al.* 2003). Les pics localisés à certaines énergies permettent d'identifier les éléments.

Les données collectées par les techniques de radiométrie spectrométrique peuvent être utilisées pour produire des représentations spatiales des concentrations de radionucléides à travers les paysages agricoles. Ces concentrations sont reliées principalement à la minéralogie et à la géochimie du matériel parent, et secondairement aux processus de lessivage conduisant à la formation des sols (Ward, 1981). Les techniques radiométriques fournissent donc l'opportunité d'obtenir des informations complémentaires et judicieuses pour caractériser les sols (Gourlay et Sparks 1996). Pour réaliser des levés, les détecteurs de rayonnements gamma sont embarqués dans des avions, des hélicoptères ou déplacés près du sol (Smettem et Pracilio 2005, Wong et Asseng 2006).

En général, les rayons gamma peuvent se déplacer d'environ 700 mètres dans l'air, de 50 cm dans les roches et de seulement quelques centimètres dans une plaque de plomb. Les rayons gamma mesurés en surface sont essentiellement produits dans les premiers 25 centimètres du sol. Le rayonnement gamma est en effet très rapidement atténué. On estime que dans les sols sableux, la contribution aux mesures enregistrées en surface des horizons diminue de moitié tous les 10cm (Spielberg 1975). Les rayons gamma provenant des couches plus profondes sont absorbés durant leur trajet car ils interagissent avec la matière (Parasnis 1997). L'atténuation due à la couche d'air est beaucoup moins importante que l'atténuation dans le sol. Les rayons gamma peuvent

traverser plusieurs centaines de mètres d'air sans affaiblissement notable. Cependant, l'altitude ajoute un effet de moyennage spatial des mesures. Les rayons gamma proviennent d'une surface au sol de plus en plus grande au fur et à mesure que l'altitude de la sonde augmente. Pour plus de précisions, des auteurs recommandent des passages à basses altitudes (Taylor *et al.* 2002) de l'ordre de 20 m. A cette distance, la surface échantillonnée correspond selon ces auteurs à un ellipsoïde de 80 m de long et de 40 m de large. Il est à noter que l'augmentation de la vitesse de déplacement linéaire des sondes diminue significativement le nombre de rayons gamma collectés et donc la sensibilité des mesures.

Relation entre le rayonnement gamma et les propriétés des sols

Le rayonnement gamma permet de caractériser la composition des sols. Par exemple, les sols sableux sont souvent constitués principalement de quartz et possèdent un faible taux de radioactivité gamma quelque soit l'élément considéré (Cook *et al.* 1996). Il faut cependant noter que certains sables arkosiques riches en feldspaths potassiques donnent de très fortes signatures radiométriques. Des études ont aussi relié les rayonnements gamma à la proportion d'argile présentes dans les sols (Wong et Harper 1999, Pracilio *et al.* 2006, Wong et Asseng 2006). Ce constat est important car le pourcentage d'argile dans les sols sableux contrôle la fraction d'eau disponible pour les plantes (Wong et Asseng 2006). Cette teneur en argile détermine également le pouvoir tampon de l'acidité des sols, son pH, et par conséquent la dynamique de certains anions et cations essentiels à la croissance des plantes (comme les nitrates).

Parfois, c'est le rapport entre les différents isotopes qui est informatif. Le rapport Th/U par exemple permet de définir des zones de mêmes caractéristiques. Par exemple, les sols latéritiques constitués d'éléments grossiers ont des abondances très faibles de K due au lessivage intense mais sont enrichis en Th à cause de l'adsorption par les oxydes ferreux (Wong et Asseng 2006). Les déséquilibres entre les éléments sont parfois reportés sous la forme de ratio.

L'analyse spectrométrique de rayonnement gamma permet de prédire également les concentrations en différents éléments comme le K, le Th et l'uranium (Pracilio *et al.* 2006). Le ⁴⁰K est l'isotope radioactif du potassium et sa proportion, constante dans la nature, est de 0.012% du potassium total. Ceci permet une détermination directe des valeurs du K total connaissant l'activité du ⁴⁰K.. A l'opposé, les deux isotopes de

l'uranium ²³⁸U et ²³⁵U ne produisent pas directement de rayonnements gammas ce qui nécessite une estimation de concentrations basée sur l'activité d'isotopes fils émetteurs de rayonnements gamma (IAEA, 2003). Pour l'uranium, le ²¹⁴Bi et le ²¹⁴Pb sont utilisés pour estimer une concentration équivalente en uranium (eU). Cette concentration équivalente suppose une désintégration à l'équilibre de l'uranium. Sachant que l'uranium se déstabilise en radionucléides secondaires comme le radon (gazeux), cet *a priori* est parfois faux ce qui peut fausser les résultats des données radiométriques. Tout comme pour l'uranium, les concentrations en ²³²Th sont estimées indirectement en mesurant l'activité du ²⁰⁸TI qui est un émetteur de rayonnements gamma. Dans la nature, la chaine de décroissance du thorium est presque tout le temps à l'équilibre ce qui se traduit par des valeurs en eTh plus robustes.

La mesure du rayonnement gamma est courante aujourd'hui pour caractériser les formations géologiques et est appliquée pour l'exploration minière et pétrolière. Concernant la caractérisation des sols, ces techniques ont été employées avec succès. Des auteurs ont ainsi mis en évidence de très bonnes relations entre la texture du sol, en particulier le pourcentage d'argile, et les comptes totaux de rayons gamma, notamment les concentrations en thorium (Taylor *et al.* 2002). Les auteurs notent d'autres relations linéaires significatives entre des rapports thorium sur potassium et la texture des sols mesurés dans les 10 premiers centimètres de profondeur. Il est à noter que cette étude a pourtant été effectuée à l'aide d'une sonde de détection de rayons gamma embarquée dans un hélicoptère passant au-dessus des parcelles à une altitude de 20 m.

Une seconde application potentielle serait de tracer le devenir des fertilisants dans les sols. Cette technique a été utilisée efficacement pour mesurer la contamination des eaux de surface par les fertilisants (Barisic *et al.* 1992). En effet, les concentrations en uranium (²³⁵U, ²³⁸U) ou en thorium (²³²Th) radioactifs sont reliées à la proportion de phosphates total (non radioactif) dans les fertilisants (Spalding et Sackett 1972, Barisic *et al.* 1992, Hussein 1994). L'industrie des fertilisants phosphatés utilise des minerais potassiques (sulphate de potassium et chlorure de potassium), des roches phosphatiques diverses et d'autres composés comme des acides phosphoriques et du phosphate d'ammonium. Les concentrations en radionucléides sont plus importantes dans ces fertilisants phosphatés que dans les roches de la croûte terrestre (Ghosh *et al.* 2007). Les concentrations en uranium y oscillent entre 30 et 260 ppm contre 3 à 4 ppm

dans la croute terrestre (Ghosh *et al.* 2007). Les fertilisants sont théoriquement détectables avec cette méthode. Des auteurs ont même cherché à quantifier l'exposition à ces sources de radiations additionnelles (Okeyode et Farai 2007, Khater et Al-Sewaidan 2008).

En répétant les mesures radiométriques au cours du temps, il serait peut-être envisageable de détecter directement les flux de fertilisants dans les parcelles ce qui permettrait de mieux caractériser les besoins, mais aussi les éventuels risques de contamination des eaux de surfaces et des nappes phréatiques. L'ajout continuel de fertilisants sur les parcelles agricoles contribue à l'augmentation des teneurs en éléments radioactifs dans l'environnement et constitue un problème de contamination potentiel (Ghosh *et al.* 2007, Mehra *et al.* 2007). Cependant, les facteurs naturels (minéralogie, profondeur des sols, couvertures superficielles,...) devraient avoir une influence prépondérante sur les signatures en rayonnement gamma par rapport aux influences anthropiques (ajout de fertilisants). Le problème serait alors de séparer ces deux sources de variabilité.

1.4.4. Altitude

Relation entre l'altitude et l'hydromorphie

Les modèles numériques de terrain (MNT) ont été développés dans un premier temps pour caractériser les sols à une échelle régionale (Bell *et al.* 1994). La pente et la situation topographique des sols contrôlent largement leur drainage, leur hydromorphie et donc la pédogénèse (Chaplot *et al.* 2000).

Variables dérivées

De nombreuses variables peuvent être dérivées des MNT (Chaplot *et al.* 2000). Certaines sont purement topographiques et décrivent la position d'un point par rapport à son contexte altitudinal. C'est le cas de l'altitude, la pente, la situation topographique ou courbure (sommet, plateau, encaissements...), d'autres reposent sur des principes hydrographiques d'écoulement et font intervenir des surfaces drainées ou des rapports entre les surfaces drainées et les pentes (Chaplot *et al.* 2000, Kravchenko et Bullock 2000). Des indices topographiques sont utilisés pour décrire l'hydromorphie des sols (Marques da Silva *et al.* 2008). La capacité de ces variables à décrire les caractéristiques des sols est reliée à la résolution des MNT et surtout au niveau spatial auquel ils sont calculés (Chaplot *et al.* 2000).

Covariables d'interpolation spatiale

Lorsque les relations entre les paramètres du sol, l'altitude absolue ou des variables dérivées s'avèrent robustes, les covariables calculées à partir du MNT peuvent être utilisées dans des processus de krigeage avec dérive externe, de cokrigeage ou de régressions suivis du krigeage des résidus, pour compenser un nombre de mesures limitées de la variable d'intérêt, ou pour affiner la qualité de l'estimation spatiale (Bourennane *et al.* 1996, Triantafilis *et al.* 2001).

1.5. Organisation du mémoire

1.5.1. Objectifs

Ce travail s'inscrit dans le cadre général de l'agriculture de précision où il s'agit de procéder à une caractérisation des sols d'un point de vue agronomique par des mesures indirectes. Les deux objectifs de cette étude sont:

- étudier l'utilité de mesures répétées d'émissions de rayonnement gamma pour la cartographie numérique des propriétés de sol,
- comparer cette information secondaire à celle fournie par une sonde de conductivité électrique.

Les variables principales utilisées pour l'interpolation sont les teneurs en sable, limon et argile ainsi que le taux de matière organique.

Comme proposé dans des publications récentes, des mesures complémentaires de conductivité électrique apparente et de rayonnement gamma seront associées pour produire une cartographie plus précise des propriétés des sols. Cette approche a été utilisée avec succès en Australie dans des contextes pédologiques très différents (Wong *et al.* 2008).

L'utilisation de différentes fréquences d'induction électromagnétique pour reconstituer un modèle de sol en deux ou trois dimensions est controversée. La compagnie Geonics a

produit en 1996 une note technique expliquant pourquoi elle ne construit pas de dispositifs multifréquences. Les constructeurs du GEM-2 multifréquences sont évidemment d'avis contraire (Won *et al.* 1996). Selon une récente étude, ce dispositif est capable de préciser la structure des sols avec une précision verticale de quelques centimètres (Huang 2003). Les auteurs limitent toutefois son utilisation à des environnements possédant une bonne conductivité. Des études réalisées dans d'autres domaines ont d'ailleurs exploité cette possibilité (Pellerin et Wannamaker 2005, Bongiovanni *et al.* 2008). Les argumentations opposées portent sur des aspects théoriques qui ne font pas l'objet de cette étude. Il s'agira plutôt de valider cette démarche en comparant les modèles obtenus aux mesures effectuées sur des parcelles étudiées de manière intensive, y compris en profondeur.

Finalement, comme souligné dans une section précédente, une des principales limitations des mesures indirectes en agriculture est leurs inaptitudes à fournir des informations agronomiques en temps réel permettant de moduler spatialement les travaux agricoles (comme par exemple la fertilisation). La gestion repose au contraire sur des cartographies réalisées précédemment. Le caractère hautement dynamique des systèmes sol n'est donc pas intégré. Si l'hypothèse d'existence de relations entre les rayons gamma et les nutriments du sol est vérifiée, le gestionnaire disposerait d'un outil d'évaluation en temps réel. Des applications technologiques couplant, sur la machinerie existante, le débit de fertilisation aux mesures des sondes de détection des rayons gamma seraient alors pertinentes.

1.5.2. Mise en œuvre

Dans ce projet de recherche, la mise en œuvre de l'expérimentation reprend dans ses grandes lignes la démarche classique proposée pour l'agriculture de précision (Corwin et Lesh 2003).

Dans une première étape, on procède à un échantillonnage intensif indirect des propriétés du sol en utilisant deux outils géophysiques complémentaires. Les sondes radiométriques fournissent suite à une calibration, des spectres de fréquences reflétant les concentrations en éléments radiogéniques. La conductivité électrique apparente du sol est obtenue avec la sonde GEM-2 multifréquences. L'obtention de la variabilité de la conductivité électrique en fonction de la profondeur peut être obtenue par inversion. Le

traitement numérique des données s'appuie sur la connaissance d'un modèle de sol (superposition de couches) que l'on peut obtenir par méthode de résistivité électrique ou par sondage.

Les mesures de conductivité électrique ne donnent donc pas un accès direct aux caractéristiques du sol qui intéressent l'agronome. Les mesures indirectes sont donc associées à des études réalisées en laboratoire pour établir des relations empiriques (Shaaban et Shaaban 2001). De ce fait, dans une seconde étape, des échantillons de sol sont choisies aléatoirement dans la parcelle et leurs propriétés sont mesurées au laboratoire. Les échantillons sont récoltés à différentes profondeurs pour obtenir une image de cette fin de cette information en deux dimensions. Une fosse pédologique décrit le sol dans sa profondeur. Ces calibrations ne peuvent généralement pas être généralisées à d'autres types de sols où à d'autres zones d'études (Gupta et Hanks 1972).

Finalement, des analyses numériques établissent des relations entre les paramètres obtenus par les méthodes géophysiques et les paramètres mesurés sur les échantillons. Des relations multicritères sont recherchées (Wong *et al.* 2008). Les relations robustes sont exploitées pour cartographier les caractéristiques des parcelles en trois dimensions. Ces relations ne sont pas toujours aisées à obtenir. Par exemple, c'est un ensemble de facteurs qui influencent les mesures de conductivité électrique apparente du sol. Ces facteurs peuvent être la salinité du sol, le taux d'humidité du sol, la densité apparente et d'autres facteurs non connus (Corwin et Lesch 2003). Il convient donc d'identifier précisément quels sont les facteurs qui sont responsables de la variabilité des mesures de conductivité électrique apparente. Des variables clef qui possèdent un fort pouvoir explicatif, comme le microrelief, sont intégrées dans les processus de cartographie (Liu *et al.* 2008).

1.5.3. Organisation du mémoire

Le mémoire est divisé classiquement en 5 parties: introduction, méthodologie, résultats, discussion et conclusion. Les références bibliographiques sont toutes regroupées dans une dernière partie. Les annexes présentent du matériel complémentaire comme des analyses, des cartographies et des communications réalisées.

En ce qui concerne le cœur du mémoire, les échantillonnages de sol et les analyses granulométriques proviennent des banques de données d'Agroalimentaire et Agriculture Canada (ACC). Les autres travaux présentés ont été réalisés par l'auteure de ce mémoire appuyée par des techniciens d'ACC (M. Mario Deschênes pour le levé GEM-2) ou par le Dr. Jean-Christophe Aznar (développement d'algorithmes de traitement statistiques et géostatistiques).

J'ai testé l'hypothèse d'une atténuation du rayonnement gamma par la matière organique dans un contexte forestier en collaboration avec d'autres chercheurs (publication 2). Pour ce travail, j'ai participé à l'élaboration de l'hypothèse initiale et j'ai traité les données.



2. Matériels et méthodes

2.1. Zone d'Étude

Agriculture et Agroalimentaire Canada concentre depuis plusieurs années des efforts de recherche sur le micro bassin versant du Bras d'Henri situé dans la région administrative de Chaudière-Appalaches (46 29' N ; 71 14' O). Sa superficie approximative est de 167 km² (Fig. 18). Il est constitué de deux ensembles correspondant au bassin hydrographique du ruisseau Fourchette (au nord sur la figure 18) et à celui de la rivière Bras-d'Henri (au sud).



Figure 18 Zone d'étude. Le site spécifique à cette étude se trouve dans le micro-bassin d'intervention situé près de Saint-Narcisse-de-Beaurivage

(Source : AAC ; http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1228862393658&lang=fra)

Dans cette région, les hivers sont tempérés froids avec une température moyenne hivernale de -9.4 C. La température moyenne de la saison de croissance de la végétation est de 16.6 C. Celle-ci dure en moyenne 159 jours et s'étale du mois de mai jusqu'au mois d'octobre. La période de gel débute normalement fin novembre. Les précipitations annuelles sont d'environ 873 mm de pluie et de 320 cm de neige.

Le micro-bassin du Bras d'Henri est occupé principalement par la forêt (63%). L'agriculture occupe 33% du territoire. La région est considérée comme l'une des plus intensives en termes de production animale de la province de Québec (Fig. 19). Le cheptel animal est composé de bovins et de porcs à plus de 90 %. Ces animaux sont alimentés par des cultures fourragères et des grandes cultures (maïs, soya, céréales, etc...) produites sur place.



Figure 19 Élevage du cochon en Beauce. Les porcs sont cantonnés dans des bâtiments (au fond). Ils sont alimentés avec les cultures produites sur place et des compléments. Leurs déjections sont stockées à l'extérieur dans une fosse de béton ouverte (à droite). Les lisiers sont épandus sur les terres agricoles (au premier plan).

Ce système agricole s'accompagne fréquemment de problèmes environnementaux majeurs comme la contamination des eaux de surface par érosion hydrique et transport de particules. Dans ce système de production, les superficies requises pour l'épandage des fumiers ou lisiers nécessitent d'importantes surfaces de terres agricoles. Cela peut parfois provoquer le déboisement de secteurs considérés comme zones tampons au niveau de la dynamique des éléments dans l'environnement. Pour juguler les problèmes et tenir compte des mécontentements, les gouvernements (fédéral et provincial) incitent les producteurs agricoles à adopter des pratiques respectueuses de l'environnement. Les méthodes de caractérisation des sols agricoles discutées dans ce mémoire font partie des nouveaux outils pouvant mener à une diminution de l'utilisation de fertilisants et donc à des interventions plus acceptables.

Le paysage est relativement uniforme. Le relief est ondulé (2 à 5 % de pente) ou faiblement à moyennement vallonné (Lamontagne *et al.* 2010). Les dépôts quaternaires sont d'origine marine. Ils sont constitués de dépôts sableux ou graveleux et relativement acides. Au fond des dépressions, on retrouve des sédiments fins qui couvrent de faibles étendues. Ce sont des apports lacustres (alluvions) ou fluviolacustres. D'une façon générale, la texture de ces sols varie de loams sableux à loams limoneux. On ne retrouve pratiquement pas de cailloux grossiers dans les profils de ces sols. Ces matériaux normalement associes aux tills glaciaires sont probablement présents sous la couverture de sédiments marins.

2.2. Parcelles ÉtudiÉes

Les parcelles étudiées (CH-01, CH-02, et NF-02, selon la terminologie utilisée localement sont la propriété de Monsieur Jean-Pierre Fortín (Fig. 20 et 22). Elles sont situées à 15 km de Québec, vers le sud-est, près du village de Saint-Narcisse-de-Beaurivage.



Figure 20 Parcelles étudiées (source : Google Earth, 2009).

2.3. Topographie

Ces parcelles sont étudiées depuis 2004 par AAC. Certaines données recueillies précédemment ont donc été utilisées dans cette étude. C'est le cas du modèle numérique de terrain (MNT) d'une résolution spatiale de 5 m, élaboré grâce à un levé au sol, réalisé à l'aide d'une station « Real Time Kinematic » RTK qui reçoit en temps réel des termes correctifs d'une base pour améliorer la précision des positions x,y (Fig. 21).

L'altitude et la pente (calculée comme la différence maximale d'altitude entre des cellules contigües, divisée par la distance entre deux cellules dans ARCGIS) ont été utilisées pour décrire le contexte topographique des parcelles étudiées.





Les données d'altitude n'ont pas été intégrées dans les analyses car l'objectif principal de l'étude était de comparer l'information secondaire fournie par le spectromètre de rayon gamma et la sonde de conductivité électrique.

2.4. Sols

La figure 22 présente les résultats d'une étude pédologique très détaillée (Bossé *et al.* 2010) pour ACC. Quatre séries de sols ont été identifiées: Le Bras, Beaurivage, Des Orignaux et Valères. Les séries Le Bras et Valère couvrent à part égale, 80 % de la superficie.



Figure 22 Carte pédologique détaillée des trois parcelles étudiées (Bossé et al. 2010).

Les principales caractéristiques de ces séries de sols sont résumées dans le tableau cidessous (Tab. 5). Tableau 5 Principales caractéristiques des cinq séries de sols retrouvées dans les trois parcelles à l'étude.

Série de sols	Classification taxonomique (Sous- groupe)	Classe granulométrique de la famille	Drainage
Le Bras	Gleysol humique orthique	Loameux	Mal drainé
Beaurivage	Podzol humo-ferrique gleyifié	Sableux	Modérément bien drainé
Des Orignaux	Brunisol dystrique gleyifié	Loameux	Imparfaitement drainé
Valère	Podzol humo-ferrique gleyifié	Sableux	Imparfaitement drainé

Source : Bossé et al. 2010

Des échantillons de sols prélevés en mai 2005 par AAC ont été utilisés pour obtenir des données analytiques décrivant la granulométrique du sol. Cette propriété étant relativement constante dans le temps, il a été postulé que les analyses réalisées en 2005 étaient encore représentatives en 2009 car il n'y a pas eu de perturbations importantes des sols au cours du projet.

Le paragraphe suivant décrit la méthodologie utilisée en 2005 par AAC pour réaliser cet échantillonnage. Les 109 points d'échantillonnage espacés de 50 mètres ont été dans un premier temps localisés sur l'ensemble des parcelles (CH-01 + CH-02 + NF-02). Le positionnement des points a été effectué à l'aide d'un RTK (système de navigation géographique en mode différentiel) avec une précision d'environ 5 cm. Leurs emplacements ont été indigués à l'aide de drapeaux. Pour chaque point, quatre sous échantillons de sol superficiel distants de 1 m ont été récoltés. Ils ont été combinés dans un même sac. Au total, une quantité de 500 grammes de sol a été recueillie. Le matériel a été récolté entre 0 et 20 cm de profondeur, c'est-à-dire, dans la zone principale d'enracinement des espèces cultivées. Au laboratoire, les échantillons ont été séchés, tamisés, et analysés pour obtenir les fractions d'argile, de limon, de sable et les taux de matière organique. La granulométrie a été déterminée selon la méthode de l'hydromètre modifiée (Sheldrick et Wang, 1993). La matière organique (carbone organique total) a été déterminée suite à une oxydation par voie humide au bichromate de potassium en milieu sulfurique (Tiessen et Moir, 1993). Ce travail a été effectué par ACC selon les méthodes standard employées en agriculture.

2.5 Conductivité électrique

Le dispositif utilisé pour mesurer la conductivité électrique apparente du sol est une sonde d'induction électromagnétique multifréquences de la compagnie Geophex (GEM-2). Le système, facilement maniable, consiste en un récepteur et un émetteur distants de 1.66 m (Fig. 23). Une console contrôle les champs électromagnétiques et enregistre les données.



Figure 23. Sonde d'induction électromagnétique multifréquences GEM-2 (Geophex Ltd).

Le champ magnétique détecté par le receveur du GEM-2 est divisé en deux composantes : en phase et en quadrature. Elles sont exprimées en parties par million (ppm) par rapport à l'intensité du champ primaire (Bongiovanni *et al.* 2008). La composante en phase dépend principalement de la susceptibilité magnétique du matériel et est particulièrement sensible à la présence d'objets métalliques.

La composante quadratique est reliée à la distribution de la conductivité électrique et peut être convertie en conductivité électrique apparente (σ_a en S/m) en fonction de la fréquence d'induction avec la relation suivante (Won *et al.* 1996):

$\sigma_a = 0.36 * Hq/F$

avec Hq la composante quadratique en ppm et F la fréquence d'induction en Hz.

La mise en œuvre du dispositif nécessite de conserver la sonde à la même hauteur par rapport au sol pendant l'ensemble du relevé pour ne pas introduire de biais (Huang 2005). Ce critère est pleinement respecté lorsque les dispositifs sont fixés sur des remorques non magnétiques et non métalliques (Fig. 24).



Figure 24 Dispositif utilisé dans cette étude pour les relevés de conductivité électrique par induction électromagnétique. La remorque est construite avec des matériaux non métalliques afin de supprimer des sources de bruits additionnels (source : AAC).

Pour cette étude, nous avons choisi un mode d'acquisition continu à une fréquence de 1 Hz (une mesure par seconde). Il est possible d'augmenter le rythme des acquisitions mais les données deviennent moins stables et le niveau de bruit augmente. Le véhicule se déplaçant à une vitesse modérée, la densité spatiale d'information est bien adaptée aux besoins de l'agriculture de précision. Les premières mesures enregistrées pendant les trois à cinq premières minutes sont fausses. Il faut que l'instrumentation se stabilise.

Pour localiser les mesures, un système de positionnement GPS a été ajouté au dispositif. Les données acquises par le GPS sont transférées en temps réel au GEM-2 et combinées aux données de conductivité électrique. Le système GPS utilisé est un système MINIMAX de la compagnie Hémisphère (www.hemispheregps.com). Les données mesurées par le récepteur GPS sont directement combinées aux mesures de conductivité électrique recueillies par le GEM2. Lors du transfert des données, les mesures apparaissent dans le même fichier. Il n'y a donc pas besoin d'un module spécifique dédié à l'enregistrement des mesures GPS.

Comme mentionné en introduction, la profondeur de pénétration est influencée par de nombreux facteurs (Fig. 25). Du fait que certains de ces facteurs sont difficiles voir impossibles à prendre en compte, il est impossible de configurer parfaitement *a priori* les fréquences du GEM-2.



Figure 25 Facteurs pouvant venir affecter la profondeur d'investigation d'une sonde d'induction électromagnétique (Huang 2005).



Figure 26 Profondeur d'investigation en fonction de la fréquence d'induction électromagnétique. Les fréquences disponibles pour le GEM-2 vont de 330 Hz à 47kHz.

Les concepteurs du GEM-2 ont publié des abaques permettant de sélectionner les fréquences en fonction de la conductivité apparente des sols où les mesures doivent être effectuées (Fig. 26). Ils sont utiles pour définir les fréquences utilisables. Sachant que les sols agricoles au Québec ont généralement une conductivité électrique inférieure à 15 mS/m et que les fréquences du GEM-2 sont réglables dans une gamme allant de 300 Hz à 48 kHz, on peut considérer que les plus hautes fréquences ont un pouvoir de pénétration inférieur au mètre, ce qui correspond parfaitement à nos besoins.

La sélection des fréquences doit aussi tenir compte des sources de perturbations potentielles comme les ondes électromagnétiques générées par les lignes à haute tension. Ces bruits harmoniques sont présents dans des gammes de fréquences allant de 10 à 60 Hz, c'est-à-dire à des fréquences inférieures à celles que nous avons utilisées. Cependant, il peut se former des multiples pouvant atteindre des valeurs de fréquence beaucoup plus élevées. Pour contourner ce problème, les fréquences sélectionnées ne sont pas des multiples de 60 Hz ce qui minimise les interactions avec les lignes électriques. De plus, comme les parcelles sont éloignées des habitations et des centres urbains, les autres perturbations éventuelles sont limitées. Néanmoins, pour tenir compte de ces potentielles sources d'interférences, un test a été réalisé avant de procéder aux relevés. Pour le réaliser, des données ont été acquises pendant 5 minutes alors que le GEM-2 était immobilisé. Les variations enregistrées ont été attribuées à des bruits environnementaux.et instrumentaux. Après extraction avec le logiciel fournit par la compagnie Geophex, la variance a été calculée. Les fréquences avec de forts niveaux de bruits ont été évitées.

Quinze fréquences peuvent être programmées sur cet appareil. Dans la pratique, il est préférable de s'en tenir à un nombre plus restreint pour obtenir de meilleurs résultats. Compte tenu de ces considérations et sur la base de travaux menés précédemment, nous avons retenu pour atteindre une profondeur maximale de 3 m, 4 fréquences : 1170, 3930, 13590 et 25410 Hz.

La compagnie Geophex délivre avec l'instrument un utilitaire pour transférer les données sur un ordinateur (WinGem V3) téléchargeable sur le site de la compagnie (http://www.geophex.com/GEM-2/GEM-2%20home.htm).

Ces données peuvent contenir des données aberrantes (valeurs de conductivité ou de positions géographiques en dehors des limites de validité) qui peuvent être éliminées dans une première étape. Ces données aberrantes sont éliminées.

Pour s'affranchir partiellement des bruits environnementaux, les données sont ensuite lissées au moyen de régressions locales sur la base de leur acquisition dans le temps. Les filtres sont appliqués de manière à éliminer une fraction de variance égale à la variance observée pour chaque fréquence lorsque le dispositif est stationnaire. La variance des mesures est alors attribuable à des bruits.

Une troisième source de distorsion des données peut être éliminée avant tout traitement. Il s'agit des dérives instrumentales d'origines diverses comme celles reliées aux fluctuations de températures ou de puissance des piles. Ces dérives se traduisent par une variation de la moyenne des mesures au cours du temps. En l'absence de stations de base fixes, les corrections sont appliquées sur une base spatiale. Elles utilisent les variations de mesures effectuées sur des points fixes (on reprend des mesures au même endroit au cours du temps) ou bien en utilisant des transects perpendiculaires aux transects principaux. Si l'on connait la forme que peut prendre la dérive au cours du temps (linéaire, sinusoïdale, ...) il est possible de caler cette loi en utilisant les mesures répétées aux points fixes entre deux passages. La correction est pertinente si les dérives sont linéaires ou, dans le cas de dérives oscillatoires, si leur période est supérieure à la différence de temps séparant la répétition des mesures aux mêmes points. Les corrections des dérives par transects perpendiculaires sont souvent préférées (ex. levés héliportés).

S'il existe une dérive au cours du temps, les points Ai et Bi des transects principaux A et B peuvent présenter des différences de valeurs qui ne sont pas caractéristiques des variabilités des sols. A l'opposé, les mesures effectuées sur le transect perpendiculaire C aux mêmes emplacements ont des différences de valeurs dues à des dérives temporelles minimes et négligeables car elles ont été acquises avec un intervalle de temps court. Les valeurs mesurées sur le transect B sont alors rehaussées pour atteindre la différence observée sur le transect C aux points de mesures Ai et Bi. Ce principe est couramment employé pour corriger les mesures géophysiques des transects aéroportés. Elles sont bien adaptées lorsque les transects sont parallèles et que l'on dispose de peu de transects perpendiculaires. Lorsqu'un quadrillage du terrain est effectué dans les deux directions avec une maille rapprochée, les données ne sont

55

souvent pas corrigées. Elles sont intégrées à la variance inexpliquée lors des processus de krigeage ultérieurs.

La meilleure solution est de disposer d'une station de base, fixe, dont le rôle est d'enregistrer ces dérives au cours du temps afin de procéder à une correction posttraitement. Avant de procéder au levé, il est nécessaire de s'assurer que les dérives enregistrées par les deux équipements sont en phase. Pour ce faire, on peut laisser un certain temps les deux appareils en acquisitions, à des stations fixes, et vérifier la bonne relation entre les variations des signaux.

Les algorithmes utilisés pour effectuer ces corrections ont été développés dans le laboratoire du Pr Marc Richer-Laflèche par J.-C. Aznar (sur la plateforme de programmation SAS). Les données entrées sont les séries temporelles de la station de base et de la station mobile. Les données de la station de base sont filtrées afin d'enlever la partie du signal correspondant au bruit instrumental et interpolées pour obtenir des mesures aux mêmes instants que la station mobile. Le bruit instrumental éliminé, les oscillations restantes correspondent aux variabilités naturelles du signal. Chaque instrument possède un bruit qui lui est particulier. Les constantes implantées à l'intérieur de l'algorithme sont donc spécifique au matériel utilisé dans le laboratoire. L'écart entre la valeur observée à la station de base et une valeur de référence est calculé à chaque instant. Cette valeur est utilisée pour corriger les enregistrements de la station mobile. Dans la pratique, l'utilisateur se contente d'ouvrir la plateforme de programmation (SAS), d'entrer dans le code de programme, les chemins d'accès aux séries temporelles, et de spécifier l'instrument utilisé (GEM-2). Le programme exporte les valeurs corrigées dans un fichier ASCII (.txt).

2.6. Radiométrie Gamma



Figure 27 Radiomètre gamma RS700. Les capteurs (un seul visible, au premier plan) sont installés dans un support fixé habituellement sur le toit des automobiles. La console (devant moi) est installée dans le support et l'antenne du GPS sur le toit. Montage INRS-ETE.

Les capteurs de rayons gamma (RS 700, Radiations Solutions Inc.) n'ont jamais été utilisés au laboratoire pour des applications agronomiques. Ils sont installés généralement sur le toit d'un véhicule tout terrain. La position haute des capteurs et l'effet d'écran du véhicule permet de s'affranchir des variabilités locales du substrat, parfois exogène, utilisé pour la construction des chemins et des routes. Dans notre cas, il s'agissait d'obtenir une mesure locale des radiations émises par le sol. Il a donc été nécessaire de construire une nouvelle remorque, plus basse, et avec des matériaux atténuant moins les radiations gamma que le métal (Fig. 27).

Les données recueillies par les capteurs sont collectées par une console située sur la remorque. Les données sont enregistrées en temps réel sur un ordinateur de terrain et sur une mémoire flash dans la console (Fig. 28). Il est donc possible de vérifier la qualité des données régulièrement, ou de réaliser des cartographies en temps réel en utilisant le logiciel «RadAssist ».



Figure 28 Enregistrement des données du radiomètre gamma. Un ordinateur de terrain (Panasonic, Toughbook) est relié au radiomètre avec un câble Ethernet (vert). Il est alimenté par une batterie 12v et un convertisseur de tension de 300 W rouge. L'ensemble est disposé dans une boite bleue étanche (Pélican). Il est nécessaire de s'assurer que le dispositif ne surchauffe pas.

Pour les acquisitions, le dispositif est déplacé avec un véhicule tout terrain léger (Fig. 29).



Figure 29 Dispositif de mesure d'émission de rayons gamma en mode d'acquisition.
2.7. Interpolation géostatistique

2.7.1. Traitements initiaux

Les signaux ambiants, les disfonctionnements de l'instrumentation géophysique et de positionnement constituent un bruit qu'il faut réduire avant tout traitement de données (Auken *et al.* 2006). Un signal moins bruité permet en particulier d'obtenir de meilleures reconstitutions de la stratification des sols ou d'établir des relations plus robustes entre les mesures géophysiques et les caractéristiques des sols. L'erreur associée aux mesures géophysiques ou aux positions GPS est acceptable lorsqu'il s'agit de dégager des relations globales mais ces erreurs prennent une importance considérable lorsqu'un nombre de données limité est utilisé. Par exemple, l'estimation géostatistique en un point est effectuée à partir des mesures réalisées autour de ce point (variables principales et secondaires). Même dans le cas où tous les points sont considérés, les voisins ont un poids très supérieur. Il est donc essentiel de s'affranchir des valeurs aberrantes, des erreurs de mesures, et du bruit contenu dans les signaux.

L'observation des enregistrements des différents appareils montre que certaines valeurs sont manquantes. Cela peut prendre la forme de données absentes (aucune valeur) ou par des valeurs aberrantes (0, -9999, ...). Ces valeurs sont enregistrées par les sondes de conductivité électrique lorsqu'elles sont proches de masses métalliques (par exemple d'une voiture, d'une grange...) ou de puissants champs magnétiques (générées par des lignes électriques de haute tension et plus rarement par la présence de minerais fortement magnétiques comme par exemple la magnétite massive). Les positions géographiques peuvent ne pas être enregistrées lorsque les signaux des satellites ne sont plus reçus par les GPS. Ces données ont été éliminées des jeux de données. Elles n'ont pas été ré-interpolées du fait du grand nombre de mesures disponibles.

Les mesures enregistrées peuvent également présenter des valeurs qui n'ont pas de significations géologique ou pédologique. Par exemple, cela peut être des positions géographiques au-delà de la zone d'étude ou des valeurs de conductivité électrique qui dépassent un seuil d'acceptabilité. Le filtrage pratiqué consistait là encore à éliminer les valeurs situées au delà des valeurs minimum et maximum acceptables (seuils d'acceptabilité).

59

L'erreur associée aux mesures est décomposable en une erreur associée à une dérive dans le temps du signal ε 1 et une erreur résiduelle aléatoire ε 2:

 $Z(t) = Zv + \epsilon 1(t) + \epsilon 2$

où Z(t) est la mesure au temps t, Zv la valeur vraie, $\varepsilon 1(t)$ la dérive autocorrélée dans le temps et $\varepsilon 2$ un terme aléatoire.

Dans le cas des GPS, l'erreur ɛ1 a été volontairement installée par le gouvernement américain propriétaire des satellites de positionnement dans un objectif stratégique militaire. Cette erreur s'apparente à une variation régulière des mesures. Au contraire ɛ2 n'a pas de cohérence temporelle et peut être considéré dans une première approche comme un bruit gaussien. Une approche classique consiste à installer des stations de base fixes. Sous l'hypothèse que les mesures de positionnement devraient être constantes au cours du temps, les variations enregistrées permettent d'obtenir la dérive instrumentale au cours du temps (Fig. 30).



Figure 30 Dérive et erreurs résiduelles de la longitude enregistrée par une station de base GPS. Les observations sont effectuées à un pas de temps de 1s (test effectué avec un GPS Garmin 76 S).

Cette solution est particulièrement coûteuse car elle impose un dédoublement du matériel. L'approche retenue pour modéliser les tendances consiste à repasser à intervalles réguliers sur les mêmes stations. La dimension réduite du territoire prospecté permettait de revenir régulièrement sur les stations de contrôle.

D'un point de vue analytique, des tests ont été pratiqués pour vérifier la présence ou l'absence de tendances dans les mesures répétées aux mêmes stations et dans l'affirmative, les tendances ont été modélisées par des régressions locales nonparamétriques. Les algorithmes utilisés proviennent de programmes SAS utilisés dans le laboratoire du professeur M. Richer-Laflèche et développés par Jean-Christophe Aznar. La matrice d'entrée contient le temps et la variable étudiée. Le code comporte un test de Phillips-Perron (test de la stationnarité des données) et renvoi une tendance modélisée, s'il y a lieu.

L'erreur aléatoire ɛ2 a été supprimée des données avec un traitement par ondelettes. L'avantage de cette technique par rapport aux filtrages de Fourrier est qu'elle permet un débruitage local, dans le domaine temporel, et supporte donc que le bruit puisse changer au cours du temps (Fedi *et al.* 2000). Le traitement utilisé est un traitement automatique proposé dans la Wavelett Toolbox de Matlab (Misiti *et al.* 2009). La méthode de décomposition était un compromis entre un lissage conservatif et un lissage important (méthode «heursure »). Puisque notre hypothèse était que les signaux étaient bruités avec un signal de type gaussien conservé tout le long du signal, un modèle de base (option « one ») a été implanté. L'ondelette choisie était une « symlett » et le niveau de décomposition était fixé à 5. Ces options sont celles couramment employées dans le laboratoire.

2.7.2. Etude exploratoire de l'échantillon

Dans une première phase exploratoire, la distribution des variables a été modélisée avec des histogrammes de fréquence et des statistiques descriptives ont été calculées (minimum, maximum, moyenne, écart-type, coefficient d'asymétrie). Le but visé est d'apprécier la distribution globale des valeurs ainsi que de repérer d'éventuelles observations divergentes.

Pour observer le comportement des variables dans l'espace, une solution consiste à visualiser leurs valeurs le long de transects. Il est ainsi possible d'apprécier si les

hypothèses de stationnarité d'ordre I (la moyenne reste constante tout le long du transect) et d'ordre II (la variance reste constante tout le long du transect) sont respectées. Les nuages de points devraient ne pas présenter de tendance à l'augmentation ou a la décroissance et devraient présenter une dispersion relativement constante le long des transects. Ce test a été effectué en positionnant de manière aléatoire un transect dans la longueur des parcelles. Les points de mesures se trouvant à moins de 5 mètres de cette ligne ont été conservés et référencés par rapport à leur position sur le transect.

L'apport de variables secondaires à l'estimation des variables principales est significatif s'il existe une relation linéaire forte entre elles. Le calcul du coefficient de corrélation de Pearson et la visualisation du nuage de corrélation ont permis de mesurer ces relations. Une attention particulière a été apportée à la détection de relations non-linéaires.

2.7.3. Préparation des matrices de données

Les analyses des échantillons de sol ont permis de construire une matrice des variables principales à estimer (Z1), les fractions granulométriques. Trois fractions ont été retenues soit, du plus fin au plus grossier : argile, limon et sable pour constituer la matrice des données mesurées.

Chaque ligne de la matrice représentait un point de mesure. Les colonnes étaient constituées des coordonnées géographiques (x,y) et des trois fractions granulométriques.

Une grille d'estimation avec une maille de 5 m a été calculée pour l'ensemble des parcelles (Fig. 31).



Figure 31 Grille de points à estimer.

La maille de 5m correspondait au niveau spatial auquel s'effectuent les interventions agricoles (passage contigu de la machinerie, épandage, fertilisation, récolte...). De plus, cette maille est couramment utilisée dans les laboratoires d'Agriculture et Agroalimentaire Canada et permet donc de mieux intégrer les cartographies réalisées aux travaux effectuées. Une résolution inférieure n'aurait pas été utile sur le plan agronomique.

Cette opération est réalisée en deux temps. Sous SAS, on génère une grille de points régulière sur une surface plus étendue que celle de la zone d'intérêt. Dans un second temps, dans ArcGis, il est facile d'extraire (opération « clip ») les points de grille se trouvant à l'intérieur d'une enveloppe représentant les territoires à étudier.

Les variables principales et les fractions granulométriques, ont été mesurées à un pas de temps réguliers. La quantité de données est très importante (plus d'un million d'enregistrements) ce qui les rend difficilement manipulables pour des traitements ultérieurs. De plus, pour étudier les relations entre les variables principales et secondaires et étudier leurs covariations, il est plus simple de posséder des matrices de points colocalisés, c'est à dire des points où l'on possède à la fois des mesures des variables principales et secondaires. Pour réduire le nombre de points, les valeurs des variables secondaires ont été estimées pour les points de grille définis précédemment. De la même façon, les variables secondaires ont été estimées aux localisations où des échantillons de sols ont été recueillis pour obtenir une matrice de variables principales et secondaires colocalisées (Z1Z2). L'estimation a été réalisée par krigeage ordinaire.

La sonde de conductivité électrique a été programmée pour mesurer la conductivité électrique apparente pour quatre fréquences (1170, 3930, 13590, 25410 Hz) qui étaient autant de variables secondaires. De la même façon, quatre variables synthétiques étaient extraites des spectres de rayons gamma (rayonnement total, K, éU, éTh). Afin de réduire le nombre de covariables, une étude multivariée en deux étapes a été réalisée. Une analyse canonique des corrélations (PROC CANCOR) a permis de retenir les covariables les plus corrélées au groupe de variables principales à cartographier. Une analyse en composantes principales (PROC PRINCOMP) a permis dans un second temps de réduire les variables restantes en nouvelles variables synthétiques, les composants principales non corrélées au la matrice Z1Z2 et les composantes ont été recalculées sur la matrice des variables secondaires (PROC SCORE) pour obtenir une matrice intitulée Z2 comprenant les variables secondaires et les composantes principales. La figure ci-dessous résume la composition des matrices utilisées pour l'interpolation géostatistique (Fig. 32).



Figure 32 Matrices utilisées pour l'interpolation géostatistique. N et n sont le nombre d'enregistrements dans les matrices, avec N >>n ; z1 est la variable principale à estimer et z2 est une variable secondaire (covariable).

2.7.4. Modèles de corégionalisation

Les variogrammes expérimentaux ont été calculés en utilisant l'expression classique:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2Nh} \sum_{i=1}^{Nh} (Z(x) - Z(x+h))^2$$

où la variable h est la distance de séparation entre les points ("*lag distance*"), Z(x) et Z(x+h) sont les valeurs de la variable Z à estimer pour les points de la paire, et Nh le nombre de paires pour la distance interpoints h. Les variogrammes croisés ("cross-variograms") ont été calculés sur les paires de la matrice Z1Z2.

En ce qui concerne le cokrigeage, les variogrammes doivent être modélisés de manière à respecter certains critères (Isaaks et Srivastava 1989). Les variogrammes directes et les variogrammes croisés doivent être exprimés comme une combinaison linéaire des mêmes structures de base (Isaaks et Srivastava 1989, Journel and Huijbregts 1978). Les structures des variogrammes, les directions d'anisotropie, et les portées ("range") de Z1 et de Z2 sont identiques. Il est nécessaire de s'assurer que les déterminants des matrices de corégionalisation qui contiennent les paramètres des structures des variogrammes soient non-négatifs, c'est à dire positifs ou nul (Goovaerts 1997).

Si les deux variogrammes directs et le variogramme croisé ($\gamma 11$, $\gamma 22$, and $\gamma 12$) sont modélisés en utilisant deux structures (g 0 and g 1), le modèle linéaire de corégionalisation est exprimé comme:

 $\begin{bmatrix} \gamma \mathbf{11}(h) & \gamma \mathbf{12}(h) \\ \gamma \mathbf{21}(h) & \gamma \mathbf{22}(h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \mathbf{011} & c \mathbf{012} \\ c \mathbf{021} & c \mathbf{022} \end{bmatrix} g \mathbf{0}(h) + \begin{bmatrix} c \mathbf{111} & c \mathbf{112} \\ c \mathbf{121} & c \mathbf{122} \end{bmatrix} g \mathbf{1}(h)$

Une condition matricielle s'exprime sous la forme:

où c0 et c1 sont les paramètres des deux structures de base.

Les variogrammes expérimentaux ont été calculés sur 10 lags en utilisant une distance de 30 mètres comme distance élémentaire. Les dix premiers lags ont été considérés pour obtenir une meilleure approximation des parties des variogrammes qui influencent le plus les poids de krigeage des points mesurés proches du point à estimer. Ces points proches sont déterminants pour l'estimation finale.

Pour détecter des anisotropies potentielles, les variogrammes expérimentaux ont été calculés dans quatre directions: 0, 45, 90, and 135 degrés. Des modèles classiquement utilisés en géostatistique (gaussiens, exponentiels et sphériques) ont été ajustés sur les mesures de semivariance. Un ajustement automatique utilisant des régressions non-linéaires ont permis d'obtenir des premières valeurs des pépites ("nugget"), des plateaux ("sill") et des portées ("range"). Ces paramètres ont ensuite été ajustés manuellement.

2.7.5. Interpolation

Une des méthodes d'interpolation utilisées pour tenir compte de l'information secondaire est le cokrigeage (COK). Cette technique permet d'incorporer une information dense et corrélée linéairement avec la variable principale à estimer (Journel et Huijbregts 1978). Cette approche suppose l'existence d'une relation linéaire entre la variable principale et la variable secondaire. Les cokrigeage ordinaires et simples diffèrent par la méthode utilisée pour modéliser les moyennes des variables principales et secondaires. Le cokrigeage simple fait l'hypothèse que les moyennes sont constantes pour la zone d'étude (Goovaerts 1998). Les études réalisées précédemment laissent supposer que cette condition n'est pas respectée pour nos parcelles. La zone sud (en bas de pente) est plus riche en argile. Localement, la moyenne peut donc différer de celle calculée pour l'ensemble des données. A l'opposé, le cokrigeage ordinaire ne nécessite pas une connaissance *a priori* des moyennes. Cette technique qui peut s'accommoder d'une non-stationarité des moyennes des variables principales et secondaires a donc été préférée (Goovaerts 1998).

L'estimation par cokrigeage ordinaire Z* pour la localité x peut être exprimée comme:

$$Z * (x) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda 1i, Z 1(xi) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda 2j, Z 2(xj)$$

Z1 et Z2 sont les variables principale et secondaire respectivement, λ 1 et λ 2 sont les poids correspondant aux N1 et N2 points considérés pour chacune des variables. Les moyennes de Z1 et de Z2 n'apparaissent pas dans l'équation précédente car leurs poids respectifs sont fixés à 1 et 0 respectivement. Ceci introduit deux nouvelles contraintes:

$$\sum_{i=1}^{N1} \lambda 1 = 1$$
$$\sum_{j=1}^{N2} \lambda 2 = 0$$

Pour résoudre le système de krigeage correspondant, on utilise des paramètres de Lagrange. En notation matricielle, le système de cokrigeage ordinaire pour deux variables s'écrit alors:

γ_{ij}^{11}	γ_{ij}^{12} 1	0	λ_i^1		γ_{ix}^{11}
γ_{ij}^{12}	γ^{22}_{ij} 0	1	λ_i^2	=	γ_{ix}^{22}
1	0 0	0	μ_1		1
0	1 0	0	μ_2		0

où λ sont les poids de krigeage affectés à chaque point, μ sont les paramètres de Lagrange, et γ ij sont les valeurs de semivariance calculées pour les points xi and xj. γ^{11} , γ^{22} , et γ^{12} réfèrent aux variables Z1, Z2, et aux variogrammes croisés respectivement. γ^{11}_{ix} , γ^{22}_{ix} sont les valeurs de semivariance calculées entre les points Z1 et Z2 et les localités estimées Z*(x).

Les estimations ont été calculées pour les mêmes points que Z2 mais les positions ont été décalées de 50 centimètres pour éviter l'effet de superposition. Le COK a été réalisé en utilisant 6 et 12 voisins pour les variables Z2 et Z1 respectivement. Comme l'information secondaire était disponible pour chaque point à estimer, il n'était pas nécessaire de retenir un nombre plus important de voisins (Goovaerts 1998).

Un krigeage ordinaire utilisant seulement les variables principales a aussi été utilisé. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par cokrigeage a permis d'évaluer l'intérêt des covariables. Les erreurs d'estimations obtenues avec le krigeage ordinaire ont été comparées à celles obtenues par OCK.

Des procédures de validation croisée ont été utilisées pour estimer la précision des estimations. A chaque itération, une valeur mesurée de Z1 a été retirée du jeu de données et a été estimée par le processus d'interpolation. A l'itération suivante, le point était remis dans le jeu de données et un autre point était supprimé. Au total, tous les points de la matrice Z1 ont été estimés, ce qui a permis d'obtenir pour chaque position une valeur mesurée et estimée. Les différences entre les valeurs mesurées et

observées ont été utilisées pour calculer des erreurs moyennes absolues (MAE, "Mean Absolute Errors"). Les gains d'estimation exprimés en pourcentage, ont été définis comme la différence entre les MAE obtenues par krigage ordinaire et cokrigeage divisée par la moyenne de la variable principale.

2.8. Nature compositionnelle des données

Pour chaque point interpolé, la somme des trois fractions d'argile, de limon et de sable doit être de 100%. Si chaque fraction est interpolée de manière indépendante et sans transformation préalable, la somme des fractions par point peut potentiellement diverger de 100%. De nombreuses méthodes ont été proposées pour interpoler des données compositionnelles.

La première approche consiste à ignorer la nature compositionnelle des données, de kriger chaque fraction de manière indépendante, de s'assurer que la somme des fractions par point interpolés est proche de 100% et de procéder ensuite à une simple transformation :

fraction finale = (fraction initiale / somme des fractions initiales) * 100

L'écart entre la somme initiale des fractions et la valeur de 100% est d'autant mieux respectée que le nombre de fraction est faible (ce qui est le cas dans cette étude). Les méthodes d'interpolation qui produisent des valeurs qui peuvent diverger des intervalles des variables initiales ne permettent pas d'utiliser cette approche. Ce n'est pas le cas du cokrigeage qui a au contraire tendance à lisser les valeurs. Il existe également des méthodes élaborées de krigeage pour données compositionnelles.

Dans une première approche et avant de mettre en œuvre des techniques plus sophistiquées, les variables principales ont été considérées comme aléatoires non bornées dans les processus de krigeage. L'observation des résultats obtenus et en particulier des sommes des fractions par points pourra valider ou invalider ce choix *a priori*.



3. Résultats

La correction des données a été simplifiée par le fait que peu de points présentaient de données aberrantes ou absentes (moins de 0.1%). De la même manière, il n'a pas été observé de tendance temporelle dans les données. Le temps relativement court d'acquisition et la relative constance des conditions météorologiques expliquent sans doute ce résultat en ce qui concerne les sondes géophysiques. Pour les données GPS, les erreurs de positionnement relatif étaient inférieures au mètre. Le système MINIMAX utilise une correction de type DGPS qui augmente la précision par rapport à des systèmes plus classiques.

Les histogrammes de fréquence ont révélé que les distributions des variables primaires et secondaires ne différaient significativement de distributions normales sauf pour la MO (Annexe 1). Quelques points de mesure présentaient de fortes valeurs, aux alentours de 20%. Par conséquent, les teneurs en MO ont été transformées en logarithme (logMO).

Les points situés le long d'un transect positionnés de manière aléatoire dans le grand axe des parcelles permettent de voir que les variables secondaires, dans leur ensemble, peuvent être considérées comme stationnaires d'ordre 1 et 2 (Fig. 33).



La valeur ne semble pas augmenter ou diminuer le long du transect ce qui indique une stationnarité de la moyenne ou stationnarité d'ordre 1. De la même façon, les points se dispersent de manière homogène le long du transect indiquant une stabilité spatiale de la variance ou stationnarité d'ordre 2. Seuls l'altitude (Fig. 34) et la pente (Fig. 35) montrent une nette non stationnarité de leur moyenne. L'altitude augmente vers le nordest alors que la pente à l'opposé diminue.



Figure 34 Variation de l'altitude le long du transect d'observation de la stationnarité.



Figure 35 Variation de la pente le long du transect d'observation de la stationnarité.

La non stationnarité de l'altitude et de la pente suggère des phénomènes de drainage différents mais nous avons fait l'hypothèse que cette observation ne constituait pas un problème majeur puisque l'ensemble des covariables retenues pour l'estimation géostatistique étaient stationnaire comme l'illustre la figure 36.





Les variables principales n'ont pas été échantillonnées avec la même intensité que les variables secondaires et le nombre de points sur le transect ne permet pas de se faire une idée juste de la stationnarité de ces variables.

Les analyses de corrélations canoniques (Tab. 6) ont confirmé que les variables principales sont associées significativement aux variables secondaires (test Lambda de Wilks: W < 0.001).

L'analyse canonique permet de mesurer quelles sont les variables secondaires, prises individuellement qui sont le mieux reliées aux variables principales.

	W1gamm a	W1em
Variance expliquée (%)	84	96
Sable	0.37	-0.78
Limon	-0.33	0.76
Argile	-0.45	0.69
LogMO	0.52	0.03
Gamma total	-0.98	
К	-0.73	
Th	-0.45	
U	-0.14	
Th/K	-0.04	
U/Th	0.06	
U/K	0.05	
Ec1		0.38
Ec2		0.92
Ec3		0.98
Ec4		0.99

Tableau 6 Corrélations canoniques entre les variables principales, secondaires et les variables synthétiques (W1 et W2).

Alors qu'une simple analyse en composante principales définirait des axes sur le base de la variance totale de la matrice (toutes les variables principales et secondaires confondues), l'analyse canonique des corrélations définie les vecteurs propres ou axes canoniques de manière à maximiser les relations entre les deux groupes de variables, c'est-à-dire le groupe des variables principales (les fractions granulométriques) et les variables secondaires (sondes gamma et em). Des présentations simples, des

techniques d'analyses multivariées de 2 tableaux appareillés selon les relevés sont disponibles en libre accès sur le serveur de l'université de Lyon I (ftp://biomol.univ-lyon1.fr/pub/mac/ADE/ADE4/DocThemPDF).

Le premier vecteur propre (W1) expliquait la majeure partie de la variance soit 84 et 96% pour les variables obtenues avec le spectromètre de rayons gamma (gamma total, K, U, Th) et la sonde de conductivité électrique (Ec1, Ec2, Ec3, Ec4) respectivement (première ligne du tableau, variance expliquée). Le fait de construire des variables secondaires synthétiques (Z2_{em} et Z2_{gamma}) à partir des projections des points sur cet axe unique (comme pour les scores factoriels) est donc justifié.

Le taux de matière organique était principalement corrélé (inversement) aux variables obtenues avec le spectromètre de rayon gamma. Dans le tableau 6, les émissions total de rayons gamma (Gamma total), ainsi que celles relatives au K et au Th sont corrélées négativement avec le premier axe canonique tandis que le logarithme de la matière organique (logMO) est corrélé positivement. Les taux de matière organique étaient peu associés aux mesures obtenues avec la sonde électromagnétique.

A l'opposé, les taux de sable, de limon et d'argile étaient plus reliés aux trois plus hautes fréquences de la sonde électromagnétique (Ec2, Ec3 et Ec4) qu'aux variables obtenues avec la sonde de rayons gamma.

Comme attendue, les deux sondes fournissent une information complémentaire. Deux variables obtenues avec le spectromètre de rayon gamma ont été retenues pour définir une première variable secondaire Z2_{gamma} : les émissions totales de rayons gamma et celles relatives au K. De la même façon, les mesures de conductivité électrique apparente correspondant aux trois plus hautes fréquences d'induction (Ec2, Ec3 et Ec4) ont été retenues pour calculer une variable synthétique Z2em.

Les valeurs de semivariance ne montraient aucune différence significative pour les quatre directions d'anisotropie. Par conséquent, seuls des variogrammes omnidirectionnels ont été utilisés. Les modèles exponentiels sont ceux qui ajustaient le mieux ces données :

exponential $\gamma(h) = c0 + c1 * (1 - exp(-h/a1))$

Les valeurs de semivariance augmentaient régulièrement lorsque la séparation entre les paires de points augmentait pour les variogrammes directs et les variogrammes croisés. Cependant, les valeurs de semivariance ne montraient pas de patron d'organisation pour le variogramme croisé calculé entre MO et $Z2_{em}$. Ces deux variables ne montraient d'ailleurs aucune correlation (r = 0.03). Par conséquent, le cokrigeage des taux de matière organique avec une information secondaire dérivée de la sonde électromagnétique a été effectué dans un but de comparaison uniquement.

Les modèles exponentiels ajustaient étroitement aux semivariogrammes expérimentaux (Tab. 7). L'information secondaire fournie par les sondes gamma et EM augmentait la précision des estimations (Tab. 8).

La moyenne des erreurs absolues (MAE) était diminuée quand les variables principales étaient interpolées en utilisant des covariables dans un processus de cokrigeage. Les gains étaient significatifs.

Tableau 7 Paramètres des variogrammes exponentiels. Les covariables utilisées sont dérivées des mesures effectuées avec un spectromètre de rayon gamma (Z2gamma) et d'une sonde électromagnétique (Z2em). La valeur de la portée (range) a été fixée à 200 mètres pour tous les modèles de variogramme.

	Direct		Z1Z2gamma		Z1Z2 _{em}		
	C0	C1	C0	C1	CO	C1	
Argile	1.5	3.5	0	0.75	0	1.35	
Sable	50	100	0	3.1	0	8.6	
Limon	35	85	0	2.6	0	7.4	
logMO	0.1	0.12	0.15	0.11	(0)	(0.02)	
Z2 _{gamma}	0.52	0.64					
Z2 _{em}	0.01	0.97					

Notes: logMO = logarithme de la fraction de matière organique dans le sol; C0 = pépite; C1 = plateau.

ы. ¹	Cokrigeage							h. L	Krigeage ordinaire			
	Spectro	mètre d	e rayon	gamma	Senseur EM			<u>.</u>				
	S	A	L	MO	S	A	L	МО	S	A	L	МО
R	0.71	0.54	0.70	0.72	0.79	0.66	0.77	0.41	0.73	0.51	0.71	0.41
MAE	6.70	1.37	5.89	0.22	5.93	1.26	5.31	0.29	8.60	2.00	7.75	0.28
Gain	3.00	6.70	6.60	3.50	4.20	7.90	8.70	0				

 Tableau 8 Erreurs d'estimation associées aux valeurs interpolées des fractions granulométriques.

 Les résultats proviennent des procédures de validation croisée.

Notes: S = sable ; A = argile ; L=limon ; MO = logarithme de la fraction de matière organique; R = coefficient de corrélation de Pearson calculé entre les valeurs prédites et observées; MAE = moyenne des erreurs absolues d'estimation. Le gain exprimé comme un pourcentage est la différence entre les valeurs de MAE obtenues avec le cokrigeage et celles obtenues avec un krigeage ordinaire divisé par la moyenne de la variable principale.

La sonde d'induction électromagnétique fournissait la meilleure covariable pour estimer les fractions d'argile, de limon et de sable avec des gains de l'ordre de 4.2 à 8.7 %. Cependant, cette information secondaire n'était pas pertinente pour prédire les taux de matière organique dans les sols. Les MAE n'étaient pas réduites en comparaison de celles obtenue avec un krigreage ordinaire. Au contraire, le spectromètre de rayon gamma fournissait une covariable qui permettait de réduire d'environ 3.5% les MAE. Par conséquent, le spectromètre de rayon gamma permettait d'obtenir une information secondaire complémentaire qui n'était pas redondante avec celle obtenue avec la sonde électromagnétique. La cartographie du taux de matière organique de la couche de surface du sol illustre bien l'intérêt d'utiliser la covariable dérivée du spectromètre de rayons gamma (Fig. 37).



Figure 37 Cartographie numérique du taux de matière organique dans les sols selon différentes méthodes d'interpolation.

Au contraire, la carte des teneurs en MO obtenue par cokrigeage en utilisant la variable dérivée des mesures obtenues avec la sonde électromagnétique n'est pas très différente de celle obtenue en utilisant un simple krigeage ordinaire et la variable principale seulement. L'information secondaire révèle des patrons spatiaux qui ne sont pas observés sur les cartes obtenues avec les variables principales seules.

Les fractions granulométriques et le taux de matière organique sont déterminés en partie par des variabilités locales de la topographie. Les lignes visibles sur les cartes organisées dans la longueur des parcelles correspondent aux planches arrondies que les agriculteurs ont modelées pour faciliter l'élimination de l'eau des parcelles. Les dépressions crées par l'agriculteur contribuent en partie au drainage des parcelles.

Au fil des ans, cette pratique crée un certain contraste de la granulométrie entre les zones en creux (dépressions) et les bosses (sommet des planches).

Ces variabilités ne sont pas perçues lorsque la variable principale seule est utilisée (krigeage ordinaire).

Finalement, la somme des fractions calculée pour chaque point interpolé s'étalait entre des valeurs extrêmes de 98 et 102%, ce qui constitue une erreur raisonnable associée à la non prise en compte de la nature compositionnelle des données. Par conséquent, le

choix de ne pas tenir compte de la nature compositionnelle des fractions granulométriques s'avère judicieux.

4. Discussions, conclusions et perspectives

Comme attendu, le spectromètre de rayon gamma et la sonde électromagnétique fournissent des informations complémentaires qui permettent d'estimer plus précisément les propriétés du sol. Le taux de matière organique, qui n'est pas corrélé aux conductivités électriques apparentes est corrélé négativement avec les émissions totales de rayon gamma et celles relatives au ⁴⁰K. L'utilisation d'une covariable dérivée de ces mesures d'émissions de rayons gamma permet finalement d'augmenter la précision des estimations (i.e. de réduire l'erreur d'interpolation), des taux de matière organique dans les sols de 3.5%. Ces résultats ont fait l'objet d'un article soumis pour publication (Annexe 4).

Les cartes numériques des propriétés du sol s'appuient sur des corrélations empiriques, mais non démontrées expérimentalement. Il est malgré tout essentiel de réfléchir à ces relations pour comprendre les limites de la méthodologie utilisée ou pour définir de nouvelles applications.

Plus le taux de matière organique du sol augmente et plus la "quantité" de rayons gamma enregistrée par le spectromètre diminue. J'ai attribué cette observation à une atténuation du signal par la matière organique qui joue un effet d'écran. En effet, la matière organique ne produit pas de rayon gamma. Sachant que le signal recueilli par le spectromètre est défini par les 20 premiers centimètres du sol essentiellement, il est logique de penser que plus les taux de matière organique augmente, plus la fraction de sol minéral diminue et que par conséquent plus le nombre de rayons gamma émis en surface diminue. Pour vérifier cette hypothèse, une expérimentation simple pas été menée en forêt ou la matière organique forme des horizons d'épaisseur variable à la surface du sol (par accumulation et humification des éléments tombés des arbres). L'idée a été testée par le Dr. Jean-Christophe Aznar dans le cadre de son travail sur les forêts boréales. Les résultats ont montré que plus l'épaisseur des litières forestières augmentait, plus les rayons gamma enregistrés par le spectromètre diminuait (Publication acceptée par la revue Forest Ecology and Managment, Annexe 5). Cette observation pourrait être mise à profit pour améliorer la cartographie numérique des épaisseurs de litières forestières. D'autres applications sont en cours de développement. Dans le cadre de notre de notre étude, ce résultat confirme l'hypothèse d'une atténuation du rayonnement gamma par la matière organique.

81

Les travaux présentés dans ce mémoire font l'hypothèse que les différences de mesures obtenues en radiométrie gamma pourraient être reliées à des différences granulométriques. Pourtant, il a été suggéré par le professeur Bernard Long (INRS-ETE, communication personnelle) que les différences de signatures spectrales obtenues en radiométrie gamma pouvaient également provenir de différences de compositions minéralogiques (communication personnelle au moment de la soutenance de thèse). Pour vérifier cette hypothèse, trois échantillons représentatifs des différents types de sol ont été préparés et envoyés à l'Université Laval pour être analysés par la technique de diffraction des rayons X. Les échantillons ont été choisis de manière à couvrir la gamme des teneurs en argiles (fort, moyen, faible) ainsi que la situation topographique (haut, moyen, bas). Les spectres de diffraction montrent que les compositions minéralogiques sont similaires (Annexe 3). On retrouve dans les trois échantillons : du quartz, de l'albite, de l'orthose, du clinochlore, de l'illite, et de l'hornblende. Cette composition suggère fortement que les sources de ces minéraux sont essentiellement situées dans le socle précambrien. L'absence de calcite ou de dolomite montre, en particulier, qu'il n'y a pas de contribution des roches de la plateforme calcaire du Saint-Laurent. La minéralogie est donc typiquement Appalachienne. Les trois échantillons ne présentent donc pas de différences minéralogiques mais seulement granulométriques. Les différences minéralogiques ne peuvent donc pas expliquer les variabilités des réponses obtenues en spectrométrie gamma.

Les fractions d'argile, de sable et de limon sont reliées aux mesures de conductivité électrique du sol. Je pense que cette relation est en fait indirecte et liée à la porosité et à la quantité d'eau retenue dans le sol. Un sol contenant plus d'argile se draine moins bien et retient par conséquent plus d'eau interstitielle. Si cette hypothèse était vérifiée, cela signifierait que pour obtenir un maximum d'efficacité, il serait nécessaire de recueillir les mesures de conductivité électrique sur une période ou l'humidité dans le sol de parcelles à cartographier ne change pas et est très contrastée. Il faut donc exclure des périodes très pluvieuses ou très sèches. Les mesures devraient être recueillies le plus rapidement possible pour éviter des variations des mesures en fonction de l'évolution temporelle des conditions hydriques des sols. Des expérimentations portant sur la variabilité des mesures de conductivité électrique répétées pourraient être menées pour vérifier cette hypothèse et proposer d'éventuelles corrections des conductivités électriques apparentes en fonction de la variabilité de la teneur en eau des sols au moment au cours de la campagne de mesure.

Dans cette étude, le spectre de rayon gamma n'a pas été utilisé en tant que tel. Nous avons utilisé des variables regroupant certaines parties du spectre (K, U, Th) ou les comptes totaux. Ce sont ces raies (« region of interest », ROI) qui sont utilisées prioritairement en géologie. Une approche alternative serait de considérer l'information contenue dans le spectre total, c'est-à-dire considérer les intensités reportées pour chacun des 1024 canaux. Il serait alors intéressant de chercher quels sont les canaux les plus discriminants pour expliquer les variabilités observées. Il se peut que toute l'information pertinente soit contenue dans les variables utilisées, mais on peut aussi penser que la prise en compte de l'information contenue dans chaque canal permettrait d'affiner les relations. Il est possible aussi que l'information contenue dans un canal non pris en compte dans l'information synthétique (gamma total, K, U, Th) soit pertinente pour cartographier des variables des sols agricoles. Une application particulièrement intéressante pourrait être de rechercher des caractéristiques spécifiques des sols en fonction de leur signature spectrale, comme par exemple de fortes teneurs en matières organiques.

Les conductivités électriques apparentes ont été calculées pour quatre fréquences, mais seulement les plus hautes fréquences ont été retenues c'est-à-dire celles les plus reliées à la surface des sols. Les échantillons de sol ont été collectés à la surface et il n'est donc pas étonnant que les plus hautes fréquences soient les plus pertinentes à considérer, car elles ont une profondeur de pénétration moindre (Won *et al.* 1996). Dans cette étude, les résultats obtenus illustrent que les sondes multi-fréquences apparaissent d'un intérêt limité pour cartographier les propriétés de la surface du sol. Cependant, il serait possible d'obtenir des conductivités électriques en fonction de la profondeur si les données étaient inversées (Won *et al.* 1996). Il serait alors possible de cartographier les propriétés du sol en deux ou trois dimensions. Ces cartographies seraient très pertinentes pour identifier des extensions verticales et latérales de certains horizons spécifiques, comme des lits d'argile, qui contrôlent le transfert d'éléments et le drainage.

Le GEM2, en plus des mesures de conductivité, enregistrait également des données de susceptibilité magnétique. Il a été proposé par le Pr. Marc Richer-Laflèche au moment de la soutenance de thèse (communication personnelle) que ces mesures pouvaient

également présenter un intérêt pour la cartographie des propriétés des sols et notamment des concentrations en éléments. J'ai pu vérifier a posteriori cette hypothèse en utilisant des données recueillies par ACC. L'annexe 2 présente les relations graphiques entre les concentrations en éléments mesurées dans les échantillons de sol et la susceptibilité magnétique calculée pour la plus haute fréquence (25410 H). Pour effectuer ces graphiques, une matrice de données colocalisées a été créée associant les mesures de la chimie du sol et les mesures effectuées par le GEM-2 (voir la section méthode). Les graphiques ne montrent pas de relations exploitables dans une perspective de cokrigeage des concentrations en éléments dans les sols et les mesures de susceptibilité magnétique pour les parcelles étudiées. Il est important de remarquer que dans le cadre de ce travail, il n'était pas possible de faire des analyses totales des échantillons. Les valeurs de concentrations ont été obtenues avec une méthode d'extraction partielle, qui est la norme en agriculture au Québec (Melich3). En général, les concentrations totales sont reliées aux concentrations partielles et des relations existantes auraient dues apparaitre. Cependant, on ne peut exclure que la méthode de digestion des échantillons a pu biaiser les résultats obtenus. Une étude complémentaire serait nécessaire. La susceptibilité magnétique pourrait être utile pour cartographier la distribution du fer et sa spéciation sur le terrain. Aussi, il est probable que l'accélération locale du lessivage tende à diminuer les valeurs de susceptibilité magnétique en transformant progressivement la magnétite.

L'ensemble de l'information secondaire fournie par les sondes de détection des rayons gamma et électromagnétiques n'a pas été regroupée dans cette étude car l'objectif principal était de tester spécifiquement l'intérêt de chaque sonde séparément. Cependant, pour produire une cartographie, une meilleure stratégie serait d'agréger toute l'information secondaire et dans un second temps, d'extraire les variables les plus pertinentes pour cartographier les variables principales d'intérêt. De nombreuses autres variables que celles fournies par les sondes peuvent être incluses, comme l'altitude, la pente, la convexité du sol ou des indices de lessivage (Bourennane *et al.* 1996; Kravchenko et Bullock 2000; Marques da Silva *et al.* 2008; McBratney *et al.* 2003). Les cartographies à haute résolution doivent prendre en compte des facteurs qui s'expriment au niveau de la parcelle tout entière mais également des facteurs très localisés. Les cartographies réalisées dans cette étude montrent l'évidence d'une structuration spatiale à plusieurs niveaux. Aux variations globales qui s'exprimant au niveau de la parcelle

toute entière, s'ajoutent des variations locales dues aux aménagements réalisés par les agriculteurs. Beaucoup de développement restent à faire pour bien prendre en compte les facteurs qui s'expriment à plusieurs niveaux spatiaux.

Lors d'une présentation au congrès annuel de l'association québécoise des spécialistes en sciences du sol (AQSSS) tenu à Oka en juin 2010, des variables dérivées d'un modèle numérique de terrain ont été incluses dans les analyses (Annexe 6). Les résultats montrent que la meilleure information secondaire pour estimer les fractions d'argile provient de la combinaison des informations recueillies par la sonde EM et du modèle numérique de terrain, et en particulier l'altitude. Dans notre étude, l'analyse des corrélations canoniques a été utilisée pour sélectionner les meilleures variables et pour réduire les covariables à une seule variable synthétique corrélée quasi linéairement avec la variable principale. Cette méthodologie s'accorde bien avec la méthode de cokrigeage employée qui est basée sur une relation linéaire entre les variables principales et secondaires (Goovaerts 1997). D'autre part, les variables dérivées de la sonde électromagnétique (les conductivités au bout de mesurées aux quatre fréquences) sont fortement corrélées linéairement. Cependant, une observation plus précise des relations montre souvent que cette condition n'est pas respectée aux extrêmes des distributions. Les relations tendent vers un plateau pour les faibles et les fortes valeurs et finalement les courbes peuvent être perçues comme des sigmoïdes plutôt que des droites. Certaines variables, même si elles ne sont pas corrélées étroitement aux variables principales, peuvent avoir une importance pour les valeurs extrêmes. Leur rejet apprécié sur la base d'une simple corrélation n'est donc pas forcément judicieux.

Au vu des relations entre variables principales et secondaires, il serait pertinent de tester des méthodes d'interpolation qui prennent en compte la non-linéarité des relations comme c'est le cas du krigreage d'indicatrices ou du krigeage Bayesien (Christakos et Bogaert 2002; Goovaerts 2009; Savelieva *et al.* 2005; Van Meirvenne et Goovaerts 2001).

Dans ces méthodes, on recherche une relation globale entre la variable d'intérêt et la covariable. Cependant, la nature de cette relation peut changer localement. Si on reprend l'exemple des relations linéaires, les paramètres pondérant l'influence de chaque variable peuvent être modifiés localement. Des méthodes comme le krigeage de résidus (« Regression kriging ») où l'estimation des paramètres est effectuée localement

pourraient être implantées et testées. Cette approche devrait être limitée au niveau spatial de la parcelle mais prendrait tout son sens à une échelle régionale.

Les cartographies obtenues montrent que l'aménagement des parcelles a un effet structurant sur la granulométrie de surface des sols. Les lignes orientées dans l'axe des parcelles correspondent aux planches arrondies qui servent à améliorer le drainage des parcelles. Les teneurs en MO ou les fractions granulométriques ont une plus grande continuité spatiale dans l'axe des planches. Il peut donc paraître surprenant que ces structures spatiales n'aient pas été détectées comme introduisant de l'anisotropie dans les données. Un plus grand nombre d'axe d'anisotropie aurait certainement permis de considérer ce phénomène. Cependant, il est important de considérer qu'il ne s'agit pas d'une anisotropie globale, s'exprimant sur l'ensemble de la zone d'étude mais d'une anisotropie locale mieux prise en compte par le processus de krigeage. A l'échelle de la parcelle, la moyenne des variables étudiées ne varie pas considérablement et les conditions de stationnarité restent respectées. Ces structures ne sont d'ailleurs pas visibles sur les variables principales qui ont une densité spatiale trop faible. La présence de ces structures spatiales ne remet donc pas en question les résultats obtenus mais illustrent que la topographie et ses variables dérivées seraient importantes à considérer pour améliorer les cartographies des sols.

La nature compositionnelle des données n'a pas été considérée. Les variables interpolées ont été prises en compte dans les processus de krigeage comme des variables aléatoires non bornées. Cette approche a été critiquée et des auteurs ont proposé des stratégies alternatives (Lark et Bishop 2007). Cependant, les mêmes auteurs ont conclu que la transformation des variables ne conduit pas toujours à une augmentation de la précision des estimations. La principale limitation de notre approche est que la somme des fractions granulométriques estimées pour chaque position pourrait être différente de 100% (ou 1). Cependant, cette différence n'est pas critique. Les sommes des fractions d'argile, de limon et de sable estimées séparément vont de 98 à 102%. Une erreur de 2% reste acceptable.

L'étude menée se place au niveau spatial de la parcelle. Cependant, les besoins de cartographie agricole s'expriment aussi à un niveau régional. Aux larges échelles, les émissions de rayon gamma ne pourraient pas être recueillies au sol avec un spectromètre mobile. Par contre, il existe des données de rayonnement gamma qui sont collectées à un niveau régional. Ces données sont recueillies à des fins de cartographie

86

géologique et n'ont pas été utilisées à notre connaissance dans un objectif agronomique. Notre étude suggère que ces données possèdent un potentiel intéressant qu'il conviendrait d'explorer dans une suite à ce travail.

Le résultat principal obtenu dans cette étude est que la mesure des émissions de rayons gamma peuvent améliorer la cartographie des sols a fortes résolution. Un paramètre de grand intérêt pour l'agronome et l'agriculteur, le taux de matière organique, est bien relié aux rayons gamma alors qu'il n'existe aucune relation avec la conductivité électrique. Les résultats illustrent au bout du compte la forte complémentarité des différentes variables secondaires. Les cartographies s'enrichiraient si de nombreuses sources d'information étaient combinées.

Un problème inhérent à l'utilisation des sondes électromagnétiques est que ces instruments doivent être placés loin de masses métalliques importantes un ou de champs magnétiques prononcés. Elles ne peuvent donc pas être installées directement sur les outils agricoles un et les mesures sont biaisées lorsqu'on s'approche des bâtiments agricoles (observations personnelles). Au contraire, le spectromètre de rayons gamma n'est pas obligés de respecter cette contrainte et il serait possible de les installer directement sur les tracteur en opération. La cartographie serait alors réalisée au moment des travaux agricoles courant, ce qui représente une économie en termes d'efforts et donc de couts financiers.

5. Bibliographie

- Aaltonen, J. 2001. Seasonal resistivity variations in some different Swedish soils. European Journal of Engineering and Environmental Geophysics 6:33-45.
- Abdu, H., D.A. Robinson, and S.B. Jones. 2007. Comparing bulk soil electrical conductivity determination using the DUALEM-1S and EM38-DD electromagnetic induction instruments. Soil Science Society of America Journal 71:189-196.
- Adamchuk, V.I., J.W. Hummel, M.T. Morgan, and S.K. Upadhyaya. 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 44:71-91.
- Allred, B.J., M.R. Ehsani, and D. Saraswat. 2005. The impact of temperature and shallow hydrologic conditions on the magnitude and spatial pattern consistency of electromagnetic induction measured soil electrical conductivity. Transactions of the Asae 48:2123-2135.
- Allred, B.J., M.R. Ehsani, and D. Saraswat. 2006. Comparison of electromagnetic induction, capacitively-coupled resistivity, and galvanic contact resistivity methods for soil electrical conductivity measurement. Applied Engineering in Agriculture 22:215-230.
- Amezketa, E. 2007. Use of an electromagnetic technique to determine sodicity in salinesodic soils. Soil Use and Management 23:278-285.
- Annan, A.P. 1992. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors and sofware:126.
- Auken, E., L. Pellerin, N.B. Christensen, and K. Sørensen. 2006. A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods. Geophysics 71:G249-G260.
- Barisic, D., S. Lulic, and P. Miletic. 1992. Radium and uranium in phosphate fertilizers and their impact on the radioactivity of waters. Water research 26:607-611.
- Bell, J.C., R.L. Cunningham, and M.W. Havens. 1994. Soil drainage class probability mapping using a soil-landscape model. Soil Science Society of America 58:464-470.
- Besson, A., I. Cousin, A. Samouëlian, H. Boizard, and G. Richard. 2004. Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2-D electrical resistivity surveying. Soil and Tillage Research 79:239-249.
- Bollo, R., and M. Jacquemin. 1963. La Recherche de Phosphates par Radiometrie Aeroportee Geophysical Prospecting 11:550-560.
- Bongiovanni, M.V., N. Bonomo, M. de la Vega, L. Martino, and A. Osella. 2008. Rapid evaluation of multifrequency EMI data to characterize buried structures at a historical Jesuit Mission in Argentina. Journal of Applied Geophysics 64:37-46.
- Bottraud, J.C., M. Bornand, and E. Servat. 1984. Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie. Bulletin de l'Association française pour l'étude du sol:279-294

- Bourennane, H., D. King, P. Chery, and A. Bruand. 1996. Improving the kriging of a soil variable using slope gradient as external drift. European Journal of Soil Science 47:473-483.
- Brenning, A., S. Koszinski, and M. Sommer. 2008. Geostatistical homogenization of soil conductivity across field boundaries. Geoderma 143:254-260.
- Brevik, E.C., T.E. Fenton, and A. Lazari. 2006. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping Precision Agriculture 7:393-404.
- Brummer, E.C. 1998. Diversity, Stability, and Sustainable American Agriculture. Agronomy Journal 90:1-2.
- Cambouris, A.N., M.C. Nolin, B.J. Zebarth, and M.R. Laverdiere. 2006. Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and in soil properties. American Journal of Potato Research 83:381-395.
- Chaplot, V., C. Walter, and P. Curmi. 2000. Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data. Elsevier 97:405–422.
- Christakos, G., and P.S. Bogaert, M.L. 2002. Temporal GIS: Advanced Functions for Field-Based Applications Springer-Verlag, New York.
- Christensen, B.N., and K. Sorensen. 1998. Surface and borehole electric and electomagnetic methods for hydrological investigation. Environ. Eng. Geophys 3: 75-90.
- Cleaver, H. 1972. After the Green Revolution. Sustainable agriculture for development. American Economic Review 62:177-186.
- Cook, S.E., R.J. Corner, P.R. Groves, and G.J. Grealish. 1996. Use of airborne gamma radiometric data for soil mapping. Australian Journal of Soil Research 34:183-194.
- Corwin, D.L., and S.M. Lesch. 2003. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. Agronomy Journal 95:455-471.
- Corwin, D.L., and S.M. Lesch. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey protocols. Computers and Electronics in Agriculture 46:103-133. (ed.) 2006.
- CRAAQ. 2000. Guide des pratiques de conservation en grande cultures Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Distribution de livre Univers, Québec, Canada.
- Dahlin, T., and M.H. Loke. 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. Journal of Applied Geophysics 38:237-249.
- Demanet, D., F. Renardy, K. Vanneste, D. Jongmans, T. Camelbeeck, and M. Meghraoui. 2001. Case History The use of geophysical prospecting for imaging active faults in the Roer Graben, Belgium. Geophysics 66:78-89. (ed.) 2004.
- Doolittle, J.A., K.A. Sudduth, N.R. Kitchen, and S.J. Indorante. 1994. Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. Soil and Water Conservation 49:572-575.

Duchaufour, P. 1997. Pédologie : Sol, végétation, environnement Collection Abrégés, Masson, Paris.

- Eigenberg, R.A., J.W. Doran, J.A. Nienaber, R.B. Ferguson, and B.L. Woodbury. 2002. Electrical conductivity monitoring of soil condition and available N with animal manure and a cover crop. Agriculture, Ecosystems and Environment 88:183–193.
- Erdi-Krausz, G., M. Matolin, B. Minty, J.-P. Nicolet, W.S. Reford, and E. Schetselaar. 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma-ray spectrometry data, pp. 172, Vol. IAEA-TECDOC-1363. International Energy Atomic Agency, United Nations, Vienna.
- FAO, R.d.I. 2008. Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2008-2017, pp. 83, Vol. en ligne: www.oecd.org/editions/corrigenda. Organisation de Coopération et de Développement Economiques, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Fedi, M., L. Lenarduzzi, R. Primiceri, and T. Quarta. 2000. Localized denoising filtering using the wavelet transform. Pure and Applied Geophysics 157:1463-1491.
- Feifei, P., C.D. Peters-Lidard, M.J. Sale, and A.W. King. 2004. A comparison of geographical information systems-based algorithms for computing the TOPMODEL topographic index. Water resources research 40.
- Fisher, D.S., J.L. Steiner, D.M. Endale, J.A. Stuedemann, H.H. Schomberg, A.J. Franzluebbers, and S.R. Wilkinson. 2000. The relationship of land use practices to surface water quality in the Upper Oconee Watershed of Georgia. Forest Ecology and Management 128:39-48.
- Freeland, R.S., R.E. Yoder, and J.T. Ammons. 1998. Mapping shallow underground features that influence site-specific agricultural production. Journal of Applied Geophysics 40:19-27.
- Ghosh, D., A. Deb, S. Bera, R. Sengupta, and K. Kumar Patra. 2007. Measurement of natural radioactivity in chemical fertilizer and agricultural soil: evidence of high alpha activity. Environmental Geochemistry and Health 30:79-86.
- Godwin, R.J., and P.C.H. Miller. 2003. A review of the technologies for mapping withinfield variability. Biosystems Engineering 84:393-407.
- Goovaerts, P. 1997. Geostatistics for natural resources evaluation Oxford University Press, New York.
- Goovaerts, P. 1998. Ordinary cokriging revisited. Mathematical Geology 30:21-42.
- Goovaerts, P. 2009. AUTO-IK: A 2D indicator kriging program for the automated nonparametric modeling of local uncertainty in earth sciences. Computers & Geosciences 35:1255-1270.
- Gourlay, R., and T. Sparks. 1996. Value adding to radiometric for mapping soil properties. Environmental Research and Information Consortium Pty Ltd (ERIC).
- Gupta, S.C., and R.J. Hanks. 1972. Influence of water content on electrical conductivity of the soil. Soil Science Society of America 36:855-857.
- Hart, G.L., and B. Lowery. 1997. Axial-radial influence of porous cup soil solution samplers in a sandy soil. Soil Science Society of America journal 61:1765–1773.

- Hart, M.R., B.F. Quin, and M. Long Nguyen. 2004. Phosphorus Runoff from Agricultural Land and Direct Fertilizer Effects. A review. Journal of Environmental Quality 33:1954-1972.
- Hedley, C.B., I.Y. Yule, C.R. Eastwood, T.G. Shepherd, and G. Arnold. 2004. Rapid identification of soil textural and management zones using electromagnetic induction sensing of soils. Australian Journal of Soil Research 42:389-400.
- Herrero, J., A.A. Ba, and R. Aragues. 2003. Soil salinity and its distribution determined by soil sampling and electromagnetic techniques. Soil Use and Management 19:119-126.
- Huang. 2003. Real-time resistivity sounding using a hand-held broadband electromagnetic sensor. Geophysics 68:1224–1231.
- Huang, H.P. 2005. Depth of investigation for small broadband electromagnetic sensors. Geophysics 70:G135-G142.
- Hussein, F.M. 1994. Radioactivity in phosphate ore, super phosphate, and phosphogypsum in Abu-Zaabal phosphate plant Egypt. Health physics 67:280-282.
- Isaaks, E.H., and M.R. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics Oxford University Press, New York.
- Jennes, J. 2006. Topography Position Index TPI Landform Slope Classification Standardization Neighborhood Statistics. Topographic Position.
- Johnson, C.K., J.W. Doran, H.R. Duke, B.J. Wienhold, K.M. Eskridge, and J.F. Shanahan. 2001. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. Soil Science Society of America Journal 65:1829-1837. T. o. t. ASAE (ed.) 2005.
- Journel, A., and C.H. Huijbregts. 1978. Mining geostatistics Academic Press, London. U.K.
- Jung, W.K., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, R.J. Kremer, and P.P. Motavalli. 2005. Relationship of apparent soil electrical conductivity to claypan soil properties. Soil Science Society of America Journal 69:883-892.
- Khater, A.E.M., and H.A. Al-Sewaidan. 2008. Radiation exposure due to agricultural uses of phosphate fertilizers. Radiation Measurements 43:1402-1407.
- Kravchenko, A.N., and D.G. Bullock. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. Agronomy Journal 92:75-83.
- Lamotte, M., A. Bruand, M. Dabas, P. Donfack, G. Gabalda, A. Hesse, F.X. Humbel, and H. Robain. 1994. Distribution d'un horizon à forte cohésion au sein d'une couverture de sol aride du Nord-Cameroun : apport d'une prospection électrique. Comptes rendus a`l'academie des sciences. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Sciences de la terre et des planètes 318:961-968
- Lark, R.M., and T.F.A. Bishop. 2007. Cokriging particle size fractions of the soil. European Journal of Soil Science 58:763-774.
- Larry, W., and L. Henry. 2006. Advancing the frontiers of soil science towards a geoscience. Geoderma 131:257-274

- Lesch, S.M. 2005. Sensor-directed response surface sampling designs for characterizing spatial variation in soil properties. Computers and Electronics in Agriculture 46:153-179.
- Ley-Cooper, Y., J. Macnae, and S. Tweed. 2008. Estimating subsurface porosity and salt loads using airborne geophysical data. Near Surface Geophysics 6:31-37.
- Lichtfouse, E., M. Navarrete, P. Debaeke, V. Souchere, C. Alberola, and J. Menassieu. 2009. Agronomy for sustainable agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development 29:1-6.
- Liu, J., E. Pattey, M.C. Nolin, J.R. Miller, and O. Ka. 2008. Mapping within-field soil drainage using remote sensing, DEM and apparent soil electrical conductivity. Geoderma 143:261-272.
- Lund, E.D., V.I. Adamchuk, K.L. Collings, P.E. Drummond, and C.D. Christy. 2005. Development of soil pH and lime requirement maps using on-the-go sensors. Precision Agriculture:457–464.
- Maher, K. 2006. Basic Physics of Nuclear Medicine, In h. f. w. o. Wikipedia, (ed.).
- MAPAQ. 2008. Agriculture et agroalimentaire : assurer et bâtir l'avenir. Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, www.mapaq.gouv.gc.ca, Quebec.
- Marion, G.M., and K.L. Babcock. 1976. Predicting specific conductance and salt concentration in dilute aqueous solutions. Soil Science 122:181–187.
- Marques da Silva, J.R., J.O. Peça, M.J. de Carvalho, and P.M. Palma. 2008. Evaluation of spatial and temporal variability of pasture based on topography and the quality of the rainy season. Precision Agriculture 9:209-229.
- McBratney, A.B., M.L. Mendonça Santos, and B. Minasny. 2003. On digital soil mapping. Geoderma 117:3-52.
- McBride, R.A., and M.L. Bober. 1993. Quantified evaluation of quantified evaluation of agricultural soil capability at the local sacale a gis-assisted case-study fromontario, Canada. Soil Use and Management 9:58-66.
- McCutcheon, M.C., H.J. Farahani, J.D. Stednick, G.W. Buchleiter, and T.R. Green. 2006. Effect of soil water on apparent soil electrical conductivity and texture relationships in a dryland field. Biosystems Engineering 94:19-32.
- McLaughlin, A., and P. Mineau. 1995. The impact of agricultural practices on biodiversity. Agriculture, Ecosystems & Environment 55:201-212.
- Mehra, R., S. Singh, K. Singh, and R. Sonkawade. 2007. 226Ra, 232Th and 40K analysis in soil samples from some areas of Malwa region, Punjab, India using gamma ray spectrometry. Environmental monitoring and assessment 134:333-342
- Misiti, M., Y. Misiti, G. Oppenheim, and J.-M. Poggi. 2009. Wavelet Toolbox™ User's Guide The MathWorks, Inc.
- Molin, J.P., and C.N. de Castro. 2008. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. Scientia Agricola 65:567-573.

Mollard, A. 2003. Multifonctionnalité de l'agriculture et territoires: des concepts aux politiques publiques. Cahiers d'économie et sociologie rurales 66:28-54.

- Moran, S., G. Fitzgerald, A. Rango, C. Walthall, E. Barnes, W. Bausch, T. Clarke, C. Daughtry, J. Everitt, D. Escobar, J. Hatfield, K. Havstad, T. Jackson, N. Kitchen, W. Kustas, M. McGuire, P. Pinter, K. Sudduth, J. Schepers, T. Schmugge, P. Starks, and D. Upchurch. 2003. Sensor development and radiometric correction for agricultural applications. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 69:705-718.
- Okeyode, I.C., and I.P. Farai. 2007. Measurement of activity concentrations of natural radionuclides in the topsoil of IITA Ibadan by gamma-ray spectrometry. Journal of Radiological Protection 27:333-347.
- Pan, F.F., C.D. Peters-Lidard, M.J. Sale, and A.W. King. 2004. A comparison of geographical information systems-based algorithms for computing the TOPMODEL topographic index. Water Resources Research 40.
- Parasnis, D.S. 1997. principles of applied geophysical. Surveys in Geophysics 19:205-206.
- Pellerin, L., and P.E. Wannamaker. 2005. Multi-dimensional electromagnetic modeling and inversion with application to near-surface earth investigations. Computers and Electronics in Agriculture 46:71-102.
- Petersen, H., H. Fleige, W. Rabbel, and R. Horn. 2005. Applicability of geophysical prospecting methods for mapping of soil compaction and variability of soil texture on farm land. Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde 168:68-79.
- Pracilio, G., M.L. Adams, K.R.J. Smettem, and R.J. Harper. 2006. Determination of spatial distribution patterns of clay and plant available potassium contents in surface soils at the farm scale using high resolution gamma ray spectrometry. Plant and soil 282:67-82.
- Rhoades, J.D., M.T. Kaddah, A.D. Halvorson, and R.J. Prather. 1977. Establishing soil electrical conductivity salinity calibration using four electrodes cells containing undisturbed soil cores. Soil Science 123:137-141.
- Richardson, M. 2005. À la recherche de savoirs perdus? Expérience, innovation et savoirs incorporés chez des agriculteurs biologiques au Québec. Vertigo 6:http://vertigo.revues.org/index2926.html.
- Roach, I.C. 2003. Advances in Regolith: Proceedings of the CRC LEME Regional Regolith Symposia, Bentley, Australia. Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration.
- Robert, M. 1996. Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour les développement Masson, Paris.
- Robinson, D.A., I. Lebron, S.M. Lesch, and P. Shouse. 2004. Minimizing drift in electrical conductivity measurements in high temperature environments using the EM-38. Soil Science Society of America Journal 68:339-345.
- Rossel, R.A.V., H.J. Taylor, and A.B. McBratney. 2007. Geophysical tools and digital elevation models: Tools for understanding crop yield and soil variability. European Journal of Soil Science 58:343-353.
Rowell, D.L. 1994. Soil Sciences. Methods and Applications Longman, Essex, UK.

- Samouelian, A., I. Cousina, A. Tabbaghc, A. Bruandd, and G. Richarde. 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. Soil and Tillage Research 83:173-193.
- Sandor, J.A., and N.S. Eash. 1991. Significance of Ancient Agricultural Soils for Long-Term Agronomic Studies and Sustainable Agriculture Research. Agronomy Journal 83:29-37.
- Savelieva, E., V. Demyanov, M. Kanevski, M. Serre, and G. Christakos. 2005. BMEbased uncertainty assessment of the Chernobyl fallout. Geoderma 128:312-324.
- Schumann, A.W., and Q.U. Zaman. 2003. Mapping water table depth by electromagnetic induction. Applied Engineering in Agriculture 19:675-688.
- Scollar, I., A. Tabbagh, A. Hesse, and I. Herzog. 1990. Archaeological Prospecting and Remote Sensing. Department of Physics and Astronomy University of Nebraska Lincoln.674
- Shaaban, F.F., and F.A. Shaaban. 2001. Use of two-dimensional electric resistivity and ground penetrating radar for archaeological prospecting at the ancient capital of Egypt. Journal of African Earth Sciences 33:661-671.
- Shea, P.F., and J.N. Luthin. 1961. An investigation of the use of the four electrode probe for measuring soil salinity in situ. Soil Sci 92:331-339.
- Sheldrick, B.H. et C. WANG. 1993. Particle size distribution. In "Soil sampling and methods of analysis", M.R. Carter, Boca Raton, FL. Lewis Publishers.
- Smettem, K.R.J., and G. Pracilio. 2005. Mapping catchment surface soil properties using high resolution gamma radiometrics. Geophysical Research Abstracts 7:01466.
- Smith, C.N., R.S. Parrish, and D.S. Brown. 1990. Conducting field studies for testing pesticide leaching models. International Journal of Environmental Analytical Chemistry 39:3–21.
- Soltner, D. 2002. Les Bases de la production végétale 2003, tome 1 : Le Sol et son amélioration Sciences et techniques agricoles
- Spalding, R.F., and W.M. Sackett. 1972. Uranium in runoff from the Gulf of Mexico distribution province, anomalous concentration. . Science 175:629 631.
- Spielberg, D. 1975. Engineering compendium on radiation shielding. Shielding materials 2:31-33.
- Stothert, K.E., D.R. Piperno, and T.C. Andresc. 2003. Terminal Pleistocene/Early Holocene human adaptation in coastal Ecuador: the Las Vegas evidence. Quaternary International 109-110:1-179
- Sudduth, K.A., S.T. Drummond, and N.R. Kitchen. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 31:239-264. (ed.) 2003.
- Sudduth, K.A., N.R. Kitchen, W.J. Wiebold, W.D. Batchelor, G.A. Bollero, D.G. Bullock, D.E. Clay, H.L. Palm, F.J. Pierce, R.T. Schuler, and K.D. Thelen. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. Computers and Electronics in Agriculture 46:263-283.

- Taylor, M.J., K. Smettem, G. Pracilio, and W. Verboom. 2002. Relationships between soil properties and high-resolution radiometrics, central eastern Wheatbelt, Western Australia Exploration Geophysics 33:95 – 102.
- Tiessen, H. et Moir, J.O. 1993. Total and Organic Carbon. In M.R. Carter (ed.), Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis.
- Triantafilis, J., I.O.A. Odeh, and A.B. McBratney. 2001. Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. soil Science Society of America Journal 65:869-878.
- Tunstall, B. 1998. Aplication of radiometric to soil survey: Somme basic cosiderations Australian Collaborative Land Evaluation Program Newsletter 7:28-31.
- Van Meirvenne, M., and P. Goovaerts. 2001. Evaluating the probability of exceeding a site-specific soil cadmium contamination threshold. Geoderma 102:75–100.
- Viscarra Rossel, R.A., and A.B. McBratney. 1998. Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content Geoderma 85:19-39.
- Vitharana, U.W.A., M. Van Meirvenne, D. Simpson, L. Cockx, and J. De Baerdemaeker. 2008. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. Geoderma 143:206-215.
- Vougioukas, S., S. Blackmore, J. Nielsen, and S. Fountas. 2006. A two-stage optimal motion planner for autonomous agricultural vehicles Precision Agriculture 7:361-377.
- Ward, S.H. 1981. Gamma-ray spectrometry in geological mapping and uranium exploration. Economic Geology 75:840-849.
- Weller, U., M. Zipprich, M. Sommer, W.Z. Castell, and M. Wehrhan. 2007. Mapping clay content across boundaries at the landscape scale with electromagnetic induction. Soil Science Society of America Journal 71:1740-1747.
- Wilson, R.C., R.S. Freeland, J.B. Wilkerson, and W.E. Hart. 2005. Interpolation and data collection error sources for electromagnetic induction-soil electrical conductivity mapping. Applied Engineering in Agriculture 21:277-283.
- Won, I.J., D.A. Keiswetter, G.R.A. Fields, and L.C. Sutton. 1996. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor. Journal of Environmental and Engineering Geophysics 1:129-137.
- Wong, M.T.F., and R.J. Harper. 1999. Use of on-ground gamma-ray spectrometry to measure plantavailable potassium and other topsoil attributes. Australian Journal of Soil Research 37:267-277.
- Wong, M.T.F., and S. Asseng. 2006. Determining the causes of spatial and temporal variability of wheat yields at sub-field scale using a new method of upscaling a crop model. Plant and Soil 283:203-215.
- Wong, M.T.F., S. Asseng, M.J. Robertson, and Y. Oliver. 2008 Mapping subsoil acidity and shallow soil across a field with information from yield maps, geophysical sensing and the grower Precision Agriculture 9:3-15.

Zanolin, A. 2003. Irrigation de precision en Petite-Beauce: mesures au champ et modelisation stochastique spatialise'e du fonctionnement hydrique et agronomique d'une parcelle de mais, Paris VI. Paris:187.

Annexe I

Distribution des variables

Matière organique et granulométrie



Moyenne = 5.9; Min = 1.2; Max = 25.7 ; Ecart-type = 2.91 ; Coefficient d'asymétrie = 2.94



Moyenne = 62; Min = 21 ; Max = 85 ; Ecart-type = 12.6 ; Coefficient d'asymétrie = -0.7



Moyenne = 28 ; Min = 9.8 ; Max = 67 ; Ecart-type = 11 ; Coefficient d'asymétrie = 0.8

1



Moyenne = 9.3 ; Min = 5 ; Max = 18.3 ; Ecart-type = 2.2 ; Coefficient d'asymétrie = 1.2

Conductivité électrique apparente

Ec1 = 1170 Hz ; Ec2 = 3930 Hz ; Ec3 = 13590 Hz ; Ec4 = 25410 Hz







Moyenne = 62.4 ; Min = 55.6 ; Max = 73 ; Ecart-type = 4.6 ; Coefficient d'asymétrie = 0.5



Moyenne = 19 ; Min = 12.4 ; Max = 30.8 ; Ecart-type = 4.8 ; Coefficient d'asymétrie = 0.7



Moyenne = 12.1 ; Min = 5.5 ; Max = 25 ; Ecart-type = 5 ; Coefficient d'asymétrie = 0.7

Spectre de rayons gamma

Κ



Moyenne = 371 ; Min = 270 ; Max = 496 ; Ecart-type = 36 ; Coefficient d'asymétrie = 0.6



Moyenne = 4.1 ; Min = 2.5 ; Max = 6.7 ; Ecart-type = 0.7 ; Coefficient d'asymétrie = 0.4



Moyenne = 2.2 ; Min = 0.09 ; Max = 7.4 ; Ecart-type = 1.3 ; Coefficient d'asymétrie = 1



Moyenne = 9.6 ; Min = 3 ; Max = 18.1 ; Ecart-type = 3.1 ; Coefficient d'asymétrie = 0.4

éU

éTh

Annexe 2

Relations entre la chimie du sol et les mesures de susceptibilité magnétique obtenues avec la sonde GEM-2

Le GEM2, en plus des mesures de conductivité électrique, enregistrait également des données de susceptibilité magnétique. Dans cette annexe, je présente les relations graphiques entre les concentrations en éléments mesurées dans les échantillons de sol et chacune de ces variables. Il est à noter que la méthode de digestion des échantillons est une méthode d'extraction partielle (Melich3).

Pour effectuer ces graphiques, une matrice de données colocalisées a été créée associant les mesures de la chimie du sol et les mesures effectuées par le GEM-2 (voir la section méthode). Les graphiques ne montrent pas de relations exploitables dans une perspective de cokrigeage des concentrations en éléments dans les sols et les mesures de susceptibilité magnétique pour les parcelles étudiées. Il est important cependant de considérer que les concentrations sont obtenues à partir d'extraction partielles (Melich3).

Dans les graphiques, les valeurs de susceptibilité magnétique mesurées à une fréquence de 25410 Hz sont portées en ordonnée (MSusc25410). Les concentrations en divers éléments sont portées en abscisses.









Concentrations en phosphore (Melich3)







Concentrations en magnesium (Melich3)











Concentrations en fer (Melich3)

Annexe 3

Analyses minéralogiques



Il a été suggéré que des variations de compositions minéralogiques dans les sols pouvaient avoir conditionné les variations observées en radiométrie gamma. Pour vérifier cette hypothèse, trois échantillons représentatifs des différents types de sol ont été préparés et envoyés à l'Université Laval pour être analysés par la technique de diffraction des rayons X. L'annexe suivante présente les résultats de ces analyses.

Pour des raisons de cout des analyses, seuls trois échantillons de sol ont été analysés. Les échantillons ont été choisis de manière à couvrir la gamme des teneurs en argiles (fort, moyen, faible) ainsi que la situation topographique des parcelles (haut, moyen, bas).

Les spectres de diffraction montrent que les compositions minéralogiques sont similaires. On retrouve dans les trois échantillons en ordre décroissant:

du quartz,

de **l'albite**, un plagioclase commun riche en sodium, feldspath commun dans les granites, rhyolites, syénites et trachytes ainsi que dans les pegmatites,

de l'**orthose**, un feldspath potassique commun dans les roches ignées, métamorphiques et sédimentaires détritiques,

du clinochlore, un aluminosilicate hydraté proche des chlorites,

une autre argile, de l'illite

et finalement un mineral du groupe des amphiboles, de l'**hornblende** indicateur de condition de métamorphisme au faciès moyen des amphibolites

Finalement, la composition minéralogique des échantillons traduit leur origine. Les sources sont essentiellement situées dans les montagnes appalachiennes et possiblement dans le bouclier canadien (socle précambrien). L'absence de calcite ou de dolomite montre qu'il n'y a pas de contribution des roches de la plateforme du Saint-Laurent. La minéralogie est donc typiquement appalachienne.

Les trois échantillons ne présentent pas de différences minéralogiques mais seulement granulométriques. Les différences minéralogiques a elles seules ne peuvent donc pas expliquer les variabilités des réponses obtenues en spectrométrie gamma.



Echantillon numéro 29: situation topographique moyenne (milieu de pente) et taux d'argile intermédiaire







Echantillon numéro 7: plus haute altitude (haut de pente), faible taux d'argile

Annexe IV Publication 1

Spatial interpolation of soil characteristics using gamma-ray spectrometer and electromagnetic sensor data as secondary information

H. Paucar^{a,*}, J.-C. Aznar^a, M. Richer-LaFlèche^a, M.C. Nolin^b

^a Centre Eau, Terre et Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique, 490 rue de la Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9, Canada

^b Agriculture et Agroalimentaire Canada, 979 avenue de Bourgogne, bureau 140, Québec (Québec) G1W 2L4, Canada

* Corresponding author: Tel.: 001 (418) 654-3790; Fax: 001 (418) 654-2525.

E-mail address: Hilda.Paucar@ete.inrs.ca.

ABSTRACT

We tested the usefulness of a field gamma-ray spectrometer to map soil organic matter content and granulometry. Estimation errors were compared to those obtained with an electromagnetic sensor. Results show that the derived covariate constructed from the total counts and the count related to the potassium (⁴⁰K) spike increased the precision of estimated soil organic matter content by about 3.5%. The multi-frequency electromagnetic sensor did not improve the estimation of this soil parameter but it performed better than the gamma spectrometer for estimating clay, sand, and silt contents. Gamma-ray spectrometers and electromagnetic sensors can be used simultaneously to provide complementary secondary information.

Keywords: Soil granulometry, digital soil mapping, electromagnetic sensor, gamma-ray spectrometer

1. Introduction

Documenting the variability of different soil attributes within a field is essential for improving profits from crop production and product quality, and to protect the environment (Adamchuk et al., 2004; Bouma et al., 1999). Precision agriculture is based mainly on the digital mapping of soil characteristics related to soil fertility (Corwin and Lesh, 2003; Whelan and McBratney, 2000). When few direct measurements are available, secondary information is generally used during the interpolation processes (Sudduth et al., 2001). High-density information is used to compensate for the scarcity of direct soil measurements. On a regional scale, satellite imagery is often used to provide a large dataset (McBratney et al., 2003). At the farmland level, however, field geophysics sensors are widely used because they provide robust information that is not biased by interfering factors, i.e., the presence of clouds or the variation of soil surface roughness. Moreover, measurements can be optimally timed and repeated during the year if necessary (Corwin et al., 2006). Improvements in instrumentation have contributed to the popularity of field-based approaches for determining soil attributes (Moran et al., 2003).

The first geophysical sensors used in agriculture recorded soil electrical resistivity or electrical conductivity (Marion and Babcock, 1976). Measurements are related to the electrical resistivity of variable soils (Demanet et al., 2001). Electromagnetic sensors are placed above soils to avoid direct contact and collect very dense information that relates to several soil characteristics (Corwin and Lesch, 2005; Corwin and Lesh, 2003; Sudduth et al., 2003). EC_a relates to various soil attributes, including granulometric composition, moisture, CEC, and pH (Samouelian et al., 2005; Sudduth et al., 2005; Vitharana et al., 2008; Wong et al., 2008; Zanolin, 2003). However, relationships between EC_a and soil characteristics can be difficult to establish and additional sources of information may be needed (Lamotte et al., 1994).

Natural gamma-ray spectrometers have been widely used for mineral exploration and geological mapping (Erdi-Krausz et al., 2003). One of their first applications was the identification of phosphate deposits in the United States (Bollo and Jacquemin, 1963). Today, gamma-ray spectrometers are commonly used for geological mapping or natural resource exploration. Emissions are related to bedrock mineralogy and geochemistry (Tourlière et al., 2003). Large sensors are generally installed on airplanes and portable

125

spectrometers are used to provide complementary on-field calibration measurements (Erdi-Krausz et al., 2003). The use of gamma-ray emissions for soil mapping purposes is relatively new (Cook et al., 1996; Doolittle et al., 1994; Pracilio et al., 2006). Although aerial surveys can accurately map geologic features, the resolution is too low for mapping individual agricultural fields (Robertson et al., 2003). Moreover, the cost of aerial surveys is prohibitive. In contrast, new field sensors provide continuous on-field measurements at a high resolution to accurately map agricultural soils and provide an information database for precision agricultural practices.

Gamma-ray spectrometry is a passive remote sensing technique that measures the natural emission of gamma-ray radiation from the upper centimeters of the earth's surface (Wilford et al., 2006). Gamma rays are emitted by isotopes that produce rays over a range of high frequencies; the whole spectra can be recorded. The main contributors are the potassium (⁴⁰K), thorium (²³²Th), and uranium (²³⁸U) decay series (Erdi-Krausz et al., 2003). Emissions are related to several environmental factors such as mineralogical composition, weathering, or the presence of Th- and U-enriched materials. In our study, we hypothesized that total gamma-ray emissions were correlated with soil granulometry and organic matter content. Gamma rays are emitted by the upper 12 cm of soil and these emissions decrease exponentially with depth (Erdi-Krausz et al., 2003). Gamma-ray spectrometers record information that is not directly related to soil electrical conductivity and therefore provide a valuable ancillary tool to characterize the soil surface. It is interesting to compare gamma-ray measurements with those obtained from electromagnetic sensors. Gamma-ray spectrometers provide potentially complementary information that could be used to improve soil characteristic estimations (Gourlay and Sparks, 1996; Rossel et al., 2007; Taylor et al., 2002).

In general, only a small number of soil samples are taken from the field because sampling is time-consuming and laboratory analyses are costly. If these primary data are interpolated to obtain a value for each cell of a specific territory, the precision of the estimates is often low due to limited soil data. One strategy, widely used in geostatistics, to reduce error is to add a secondary variable related to the primary variable (Chilès and Delfiner, 1999; Goovaerts, 1997; Goovaerts, 2000). Soil characteristics can then be mapped using a limited number of soil samples when the secondary variable can be measured exhaustively. Obtaining data on a secondary variable that is well related to the variable of interest can be challenging. Sensors can provide interesting secondary information if the covariates derived from the measurements are well related to the soil characteristics to be mapped. In general, however, soil characteristics cannot be calculated directly with the covariate values because numerous local factors could modify relations (Rhoades et al., 1977). Thus, geostatistical interpolation methods that take into account secondary information for estimating a primary variable are widely used (Goovaerts, 1997; Triantafilis and Lesch, 2005). Both linear and non-linear relationships between the primary and the secondary variable can be modeled efficiently (Bogaert et al., 2009; Christakos and Bogaert, 2002; Savelieva et al., 2005).

In this study, we evaluated the usefulness of a gamma-ray spectrometer to obtain secondary information that was well related to soil organic matter content and granulometry. The precision of estimated values were compared to those obtained without any covariate and with those obtained with covariates derived from an electromagnetic sensor widely used in precision agriculture.

2. Methods

2.1. Study area

The study was established on three adjacent fields used by Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC) for monitoring soil and water quality, located in Saint-Narcisse-de-Beaurivage, Québec, Canada (46°29'23" N; 71°12'26" W). The fields support intensive corn/soybean production in association with dairy and pork production (Fig.1). Surface soil texture ranged from loamy sand to silty loam. The experimental site was classed as nearly level to very gently sloping (< 5 % slope), which facilitated the use of the geophysics sensors and gamma spectrometers. The climate is cold with a reduced growing season of 159 days with a mean temperature of 16.6°C. The winter mean temperature is -9.4°C. Annual precipitation is 873 mm and snow accumulation is 320 cm. In this agricultural area, intensive farming is often associated with severe environmental effects. Research projects conducted by AAFC on these fields assess how beneficial management practices (BMP) at the watershed scale positively affect surface water quality. A precise knowledge of soil characteristics is required for this objective to be met.

2.2. Soil analysis

Soils were sampled from 109 locations (50-m unaligned grid) within these fields in May 2005. The geographical position of each sample, accurate to within 5 cm, was recorded using a RTK station. Approximately 500 g of soil was collected; four subsamples were taken from each location within a 1.5-m radius circle at a depth of 0–20 cm, using a 7-cm Dutch-type auger. Soil samples were placed in plastic bags for transport. Samples were air-dried, sieved (> 2 mm), and analyzed for clay, sand, and silt content using the hydrometer method (Sheldrick and Wang, 1993), and for organic matter content using a modified Walkely-Black (wet oxidation) method (Tiessen and Moir, 1993).

2.3. Sensors

The first sensor we used to record secondary information related to the granulometric fractions was a multi-frequency electromagnetic (EM) sensor (GEM2, Geophex). Electromagnetic sensors are widely used in precision agriculture to measure apparent conductivity and to map soil characteristics (Corwin and Lesch, 2005). A primary field is induced and modified relative to the soil characteristics. A secondary field is collected by the sensor. The higher frequency signals have limited penetration into the soil and are used for recording superficial information while lower frequency signals relate more to soil characteristics in deeper horizons. In our study, the granulometric fractions were measured in superficial horizons but they could also be related to deeper soil characteristics. The multi-frequency sensors are consequently of more interest than those that record a single frequency.

Preliminary on-field measurements were conducted to define a set of frequencies for proper soil characterization: 1170, 3930, 13590, and 25410 Hz. The other parameters affecting the measurements were factory calibrated. The number of frequencies chosen was limited to avoid any bias associated with the simultaneous emissions of electromagnetic waves. We ensured that frequencies were not biased by other electromagnetic signals on the field. Secondary field recordings by the sensor are separated into two corposants: in-phase and guadratic, according to the magnetic susceptibility and the electrical conductivity of the materials, respectively (Bongiovanni et al., 2008). In our study we used the guadratic component and derived an apparent electrical conductivity expressed in S/m for each frequency (Won et al., 1996). The GEM2 was installed in a bag on a non-magnetic wood trailer and located 10 m from the vehicle (VTT) to avoid any bias. We verified that this 10-m distance was sufficient by approaching the vehicle from the GEM2 while recording measurements. We did not detect any changes in the measured values for the chosen frequencies. During the census, the sensor was located at the same distance from the ground and was not affected by changes in temperature.

The second geochemistry sensor used in this study is a RS-700 (Radiation Solutions Inc.) gamma-ray spectrometer. Gamma rays are produced naturally by the atomic disintegration of elements. The spectra is generally determined by the upper 12 cm of the formations (Erdi-Krausz et al., 2003). Gamma-ray emissions are also produced by
deeper material but are masked by the overlying layers. This constitutes a limitation for geological purposes but it is an advantage for our study that aimed to characterize upper soil formations (Tyler, 2004). The spectrometer records natural gamma-ray emissions in up to 1024 channels that are used to calculate the K, eqU, and eqTh concentrations via an internal calibration process (Erdi-Krausz et al., 2003). Total gamma-ray emissions were also computed. The first 50 channels were not considered to take the Compton effect into account.

The geographic localization of each measurement was recorded using a global positioning system associated with the two sensors (MINIMAX, Hémisphère). Acquisition frequencies were fixed to 1 Hz and the displacement velocity was under 5 km/h. Measurements were performed at 5-m spaces on transects located along the axis of field length. The EM and GRS surveys were conducted on dry soils after a rainless period to avoid any bias associated with excessive soil moisture. Measurements were repeated on several random transects and at particular points to ensure that the dataset was not affected by some trend in the field. Repetition at the same locations allowed us to correct for potential trends during the acquisition period and to verify that the relative geographical positions were accurate to within 1 meter. Increasing the precision of localization was, however, not needed for the analysis strategy used in this study.

2.4. Primary and secondary information

The total fractions of clay, silt, and sand were merged into a spatial matrix (Z1) containing all the primary information. We verified that the sum of the fractions equaled 1. We did not take into account the compositional nature of the primary variables and treated them as realizations of unbounded random variables. Because the sum of fraction estimations could not sum 1 for each interpolated location (Lark and Bishop, 2007), *a posteriori* check was conducted to ensure the adequacy of approximations. Interpolated positions were calculated by defining a grid that contained equally spaced positions. A distance of 5 meters was retained which correspond to the spatial precision used by farmers on-field.

Positions were restricted to the limits of the study area. The high frequency of acquisitions (1Hz), associated with the low displacement velocity on-fields, conduced to obtain large matrices with more than 4×10^{6} positions sometimes close to several

centimeters. Filters were first applied on the dataset to remove measurements that were outside the range for sensors and that had false geographic positions. Then, to reduce the information density and avoid redundancy, the secondary variables were calculated for each position on the interpolation grid using ordinary kriging (OK). The value obtained for each position on the grid was calculated using the measurements located in the immediate vicinity only; the neighbor distance was restricted to 2 meters. This methodology allowed us to deal with the imprecision of the registered geographic positions and was adapted for our sensor acquisitions. Measurements were performed at a higher density than for the soil volume measurements and were used to define the coordinates for each position.

To study the relationships between primary and secondary information, the values of the secondary variables were calculated for each position on the Z1 matrix. This derived matrix contained the co-located primary and secondary variables and was called Z1Z2. All variables that explained a significant part of the variation for the secondary variables were considered (Babak and Deutsch, 2009). In the first step, a multivariate technique, the canonical correlation analyses (CCA; PROC CANCOR), retained the secondary variables that explained a significant part of the granulometric fraction variation. In the second step, these selected variables were reduced to a single score (Z2) based on the score obtained for the first principal component scores, which explains the largest part of the total variation of the matrix composed of selected variables. Then, the Z2 values were calculated for each location associated with the Z2 matrix. Weights calculated on the Z1Z2 matrix were used to calculate Z2 as a linear combination of the secondary variables (PROC SCORE).

2.5. Coregionalization models

We used the usual geostatistical variogram estimator expressed as:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2Nh} \sum_{i=1}^{Nh} (Z(x) - Z(x+h))^2$$

where *h* is the lag distance between two points, Z(x) and Z(x+h) are the Z values of the pair, and *Nh* the pair number at lag *h*. Cross-variograms were calculated on pairs of the Z1Z2 matrix. Direct and cross-variograms were modeled subject to the constraint that the resulting cokriging matrix is positive definite (Isaaks and Srivastava, 1989). Direct and cross-variograms were expressed as a linear combination of the same basic structures (Isaaks and Srivastava, 1989; Journel and Huijbregts, 1978). Variogram structures, anisotropy directions, and ranges of Z1 and Z2 were the same. We verified that the determinants of the coregionalization matrices that contained the parameters of the variogram structures were non-negative (Goovaerts, 1997). If both direct and cross-variograms (γ 11, γ 22, and γ 12) are modeled using two structures (g q and g1), the linear model of coregionalization is expressed as:

 $\begin{bmatrix} \gamma 11(h) & \gamma 12(h) \\ \gamma 21(h) & \gamma 22(h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c011 & c012 \\ c021 & c022 \end{bmatrix} g0(h) + \begin{bmatrix} c111 & c112 \\ c121 & c122 \end{bmatrix} g1(h)$

The positive semi definite condition is expressed as:

 $\begin{vmatrix} c011 & c012 \\ c021 & c021 \end{vmatrix} \ge 0 \text{ and } \begin{vmatrix} c111 & c112 \\ c121 & c121 \end{vmatrix} \ge 0$

where c0 and c1 are the parameters of the two basic structures.

Experimental semivariograms were calculated on 10 lags with a 30-m lag distance. Only the first 10 lags were considered to better approximate the portion of the variogram that mainly determines the kriging weights and, consequently, the final estimates. We did not expect a strong anisotropy but experimental variograms were calculated in four directions: 0, 45, 90, and 135 degrees. Gaussian, exponential, and spherical models were adjusted based on semivariance values. Automatic fitting, using weighted least-squared non-linear regression, approximated the values for the nugget, slope, and range

parameters. Models were then manually adjusted to obtain the final parameter estimates.

2.6. Interpolation

Interpolation to account for the secondary information was the full cokriging (COK) method. Cokriging incorporates dense correlated secondary information to estimate the principal variable (Journel and Huijbregts, 1978). According to Goovaerts (1997), COK relates the primary and secondary variables on a correlation basis, which corresponds to our hypothesis that granulometric fractions are related linearly to the sensor measurements. Full COK takes into account all of the information and was preferred over other approaches that consider only the collocated secondary information (Chilès and Delfiner, 1999).

Both simple and ordinary COK differ according to the method used to model the means of primary and secondary variables. Simple cokriging assumes that primary and secondary means are constant over the study area (Goovaerts, 1998). This condition is not plausible for our data where large latitudinal variation was expected. Estimated primary and secondary local means could differ from the means calculated over the whole dataset. Ordinary cokriging was preferred because it does not require knowledge about the primary and secondary local means, nor that they be strictly stationary (Goovaerts, 1998).

The ordinary cokriging estimator Z^* at location x can be expressed as follows:

$$Z * (x) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} Z_1(xi) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} Z_2(xj)$$

where Z1 and Z2 are the primary and secondary variables, respectively, and $\lambda 1$ and $\lambda 2$ are the corresponding weights of the *N*1 and *N*2 points considered for each of the two variables, respectively. The means of Z1 and Z2 do not appear in the previous equation because their respective weights are fixed to 1 and 0, respectively. This condition introduces two supplementary constraints:

$$\sum_{i=1}^{N1} \lambda 1 = 1$$

$$\sum_{j=1}^{N^2} \lambda_2 = 0$$

Solving the corresponding kriging system requires the use of lagrangian parameters. In matrix notation, the ordinary cokriging system is written for two variables as:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{ij}^{11} & \gamma_{ij}^{12} & 1 & 0 \\ \gamma_{ij}^{12} & \gamma_{ij}^{22} & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_i^1 \\ \lambda_i^2 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{ix}^{11} \\ \gamma_{ix}^{22} \\ \gamma_{ix}^{21} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

where λ are the kriging weights assigned to each point, μ are the lagrangian parameters, and γ_{ij} are the semivariance values calculated for the *xi* and *xj* points. The parameters γ^{11} , γ^{22} , and γ^{12} refer to the *Z*1, *Z*2 variables, and the cross-variograms, respectively; γ^{11}_{ix} , γ^{22}_{ix} are the semivariance values calculated between each *Z*1 and *Z*2 point and the estimated location *Z**(*x*).

Estimates were conducted using the same locations as Z2 but were limited to our study area and decaled from an epsilon distance (few meters) to avoid the zero distance effect. Then, COK was performed for each position using the 6 and 12 nearest neighbors of the variable Z2 and Z1, respectively. Because the secondary information was available around the estimated location, it was not necessary to retain a greater neighbor number (Goovaerts, 1998).

Ordinary kriging was also performed to test the potential for increased precision with the addition of secondary information. Experimental error obtained with OK was compared with that obtained with OCK methods. A cross-validation procedure was used to evaluate the accuracy of the estimates. The measured values at each location were set to missing one at a time, and kriging was applied using the values at remaining locations and all the *Z*2 data. Differences between the measured and estimated data were calculated using the mean absolute difference (MAE). The MAE obtained by RK and

OCK were compared to those obtained with OK which used only primary information. Estimated gains were expressed as percentages, calculated as the difference between errors for OCK and OK divided by the mean of the primary variable.

Ordinary kriging, cokriging and cross-validation were computed using a modified version of the MATLAB « COKRI » code (Marcotte, 1991).

3. Results

Frequency histograms revealed that the distribution of primary and secondary variables did not differ from a normal distribution except for MO. Several points presented higher MO content than 20%, so that MO was transformed to its logarithm (logMO). Canonical correlation analysis (Table 1) confirmed that the primary variables were significantly associated to the secondary variables (Wilks' Lambda test W < 0.001).

The first eigenvector accounted for most of the total variation (84 and 96% for the gamma-ray and EM sensor variables, respectively). Soil organic matter content was inversely related to the gamma-ray variables. The total gamma-ray emissions, the K and eqTh concentrations, were related negatively to the first eigenvector but the logMO variable was positively related. At the opposite end of this axis, the sand, silt, and clay contents were more closely related to the higher EM sensor frequencies (Ec2, Ec3, and Ec4). As expected, the gamma-ray spectrometer and EM sensor variables contained complementary information; two gamma-ray variables and three EM frequencies that were correlated with the soil variables were retained on this axis. The gamma total and K were used to calculate a first secondary variable Z2_{gamma} and the three higher frequencies were retained to calculate a synthetic variable Z2_{em}.

The calculated semivariance values did not show any significant differences among the four directions of anisotropy, so we calculated only the omni-directional variograms with an exponential model, which was chosen according to the best fit (Fig. 2):

exponential: $\gamma(h) = c0 + c1 * (1 - exp(-h/a1))$

Semivariance values increased regularly with the separation between the pairs of points for all direct and cross-variograms except for one cross-variogram. However, semivariance values were without an organized pattern for the cross-variogram calculated between MO and $Z2_{em}$, which had a non-significant correlation (r = 0.03). Consequently, we were not able to adjust the semivariance values with the exponential model for this cross-variogram so that the cokriging of the MO using the EM-derived variable was computed for comparative purposes only. Exponential models were used to closely adjust the other semivariograms (Table 2).

Gamma and EM secondary information improved the precision of estimates (Table 3). Mean absolute errors were reduced when the primary variables were interpolated using covariates under a cokriging process. The gains were significant. The EM sensor provided a better covariate for estimating the sand, clay, and silt fraction with gains ranging from 4.2 to 8.7%. However, this secondary information was not useful for predicting the organic matter content. Mean absolute errors were not reduced when compared with those obtained by OK. In contrast, the gamma-ray spectrometer provided a covariate that allowed the MAE to be reduced by about 3.5%. The gamma-ray spectrometer provided valuable complementary information that was not collected by the electromagnetic sensor.

The cartography of the estimated soil organic matter content highlights the increased precision of the gamma-ray spectrometer (Fig. 3). In contrast, the map of the MO cokriged with the EM-derived variable did not differ significantly from a simple ordinary kriging that used primary information only. The secondary information revealed specific spatial features not observed on the interpolated primary data. Granulometric fractions and MO content were determined partly by the field topography. Lines visible on the maps were related to soil management (Fig. 3). Depressions improved agricultural drainage.

4. Discussion

As expected, the gamma-ray spectrometer provided complementary information that made it possible to more precisely estimate soil attributes. The organic matter content of soil, not related to the electromagnetic apparent conductivity, was highly negatively correlated with the total gamma-ray and the ⁴⁰K emissions. Consequently, the use of gamma ray-derived covariates increased the precision of estimates by about 3.5%.

This result can be explained by the potential attenuation of the gamma radiation emitted by the organic matter. In a forest stand context, it has been demonstrated that total gamma ray emissions were inversely related to the forest litter thickness (Aznar et al., 2010).

Total gamma ray and ⁴⁰K rays were selected. These two variables are closely related because ⁴⁰K provides the higher count number (Erdi-Krausz et al., 2003). Isotopic ratios (Th/K, U/K, U/Th) were also tested but the degree of association with the primary variables was reduced. Another approach would be to treat the information contained in each of the 1024 channels individually.

Apparent electrical conductivity was calculated for four frequencies but only the highest frequencies, i.e., those more closely related to the soil surface, were retained. Soil samples were collected in the topsoil and it is not surprising that the higher frequencies provided better results than the lower frequencies, which have a deeper soil-depth penetration (Won et al., 1996). Multi-frequency EM sensor data appears to be of limited interest for mapping topsoil attributes. However, it would be possible to obtain apparent electrical conductivity values along the soil depth for each location if the data were inversed (Won et al., 1996). Then, it would be possible map the soil attributes in three dimensions. Such mapping could be used to identify the vertical extension of specific horizons, like clay, that control the transfer of elements or control the drainage.

Gamma ray spectrometer and electromagnetic sensor secondary information were not pooled together in our study because the main objective of this study was to test specifically the interest of each sensor separately. To produce a predictive map, a better strategy would be to aggregate all the available secondary information and then select the secondary variables related to the primary interpolated variable. Information provided by different sensors can be aggregated as well as other information, such as topographic derived variables (elevation, slope, soil curvature, and weathering index) that control the soil attributes (Bourennane et al., 1996; Kravchenko and Bullock, 2000; Marques da Silva et al., 2008; McBratney et al., 2003).

In our study, canonical correlation analyses were used to select the best variables and to reduce the covariates to a single one, but other kriging methods could be used that take advantage of other secondary information. The cokriging approach is based on a linear relationship between the primary and secondary variables (Goovaerts, 1997). This relationship did not hold for the tails of the frequency distributions. Relationships tend to reach a sill for high and low values of the primary variables, and where the curve tends to be more sigmoid than a straight line. Then, it would be interesting to test other interpolation methods that take into account the non-linearity of the relationships, such as indicator or Bayesian kriging (Christakos and Bogaert, 2002; Goovaerts, 2009; Savelieva et al., 2005; Van Meirvenne and Goovaerts, 2001).

In our study we did not consider the compositional nature of interpolated variables and to treat them as realizations of unbounded random variables before using ordinary cokriging to map particle size distributions. This approach has been criticized by several authors who have proposed alternative analyses strategies (Lark and Bishop, 2007). However, the same authors conclude that transformations of variables may not always lead to increased precision. The main limitation of our approach is that the sum of the granulometric fractions estimated for each position could differ from 100%. In our study such differences were low and the sum of clay, sand, and silt estimated separately ranged between 98 and 102%.

Gamma-ray emissions are collected at regional levels for geologic mapping or for environmental purposes (like radon emissions). These data have never been used for agricultural purposes but the results obtained in this study suggest that they have good potential for producing digital soil maps at the regional scale.

Acknowledgements

We acknowledge the assistance of Mario Deschênes and all the personnel of Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC) who provided useful assistance for field work, soil sampling, and laboratory analyses. Also, Christina McRae, EditWorks, for structural editing of the manuscript. Funding was provided by grants allocated to the senior author by INRS-ETE and AAFC (Research Affiliate Program (RAP)).

References

- Adamchuk, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T., Upadhyaya, S.K., 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. Comput. Electron. Agr. 44, 71–91.
- Aznar, J.-C., Paucar-Munoz, H., Richer-Lafleche, M., Bégin, Y., 2010. Field litter thickness assessed by gamma-ray spectrometry. For. Ecol. Manage. in press.
- Babak, O., Deutsch, C., 2009. Collocated cokriging based on merged secondary attributes. Math. Geosci. 41, 921–926.
- Bogaert, P., Christakos, G., Jerrett, M., Yu, H.L., 2009. Spatiotemporal modelling of ozone distribution in the state of California. Atmos. Environ. 43, 2471–2480.
- Bollo, R., Jacquemin, M., 1963. La recherche de phosphates par radiometrie aeroportee Geophys. Prospect. 11, 550–560.
- Bongiovanni, M.V., Bonomo, N., de la Vega, M., Martino, L., Osella, A., 2008. Rapid evaluation of multifrequency EMI data to characterize buried structures at a historical Jesuit mission in Argentina. J. Appl. Geophys. 64, 37–46.
- Bouma, J., Stoorvogel, J., van Alphen, B.J., Booltink, H.W.G., 1999. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. Soil Sci. Soc. Am. J. 63, 1763–1768.
- Bourennane, H., King, D., Chery, P., Bruand, A., 1996. Improving the kriging of a soil variable using slope gradient as external drift. Eur. J. Soil Sci. 47, 473–483.
- Chilès, J.-P., Delfiner, P. (Eds), 1999. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. John Wiley & Sons, New York.
- Christakos, G., Bogaert, P., Serre, M., 2002. Temporal GIS: Advanced Functions for Field-Based Applications. Springer-Verlag, New York.
- Cook, S.E., Corner, R.J., Groves, P.R., Grealish, G.J., 1996. Use of airborne gamma radiometric data for soil mapping. Aust. J. Soil Res. 34, 183–194.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M., 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. Comput. Electron. Agr. 46, 11–43.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M., Oster, J.D., Kaffka, S.R., 2006. Monitoring managementinduced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity, Geoderma 131, 369–387.
- Corwin, D.L., Lesh, S.M., 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. Agron. J. 95, 455–471.
- Demanet, D., Renardy, F., Vanneste, K., Jongmans, D., Camelbeeck, T., Meghraoui, M., 2001. Case history: The use of geophysical prospecting for imaging active faults in the Roer Graben, Belgium. Geophys. 66, 78–89.
- Doolittle, J.A., Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Indorante, S.J., 1994. Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. Soil and Water Conservation 49, 572–575.

- Erdi-Krausz, G., Matolin, M., Minty, B., Nicolet, J.-P., Reford, W.S., Schetselaar, E. (Eds), 2003. Guidelines for Radioelement Mapping using Gamma-ray Spectrometry Data. International Energy Atomic Agency, United Nations, Vienna, Austria.
- Goovaerts, P. (Ed), 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York.

Goovaerts, P., 1998. Ordinary cokriging revisited. Math. Geol. 30, 21–42.

- Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. J. Hydrol. 228, 113–129.
- Goovaerts, P., 2009. AUTO-IK: A 2D indicator kriging program for the automated nonparametric modeling of local uncertainty in earth sciences. Comput. Geosci. 35, 1255–1270.
- Gourlay, R., Sparks, T., 1996. Value Adding to Radiometric for Mapping Soil Properties. Soil Quality is in the Hands of the Land Manager, Advances in Soil Quality for Land Management: Science, Practice and Policy. University of Ballarat, Victoria, Australia.
- Isaaks, E.H., Srivastava, M.R., 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York.
- Journel, A., Huijbregts, C.H. (Eds), 1978. Mining Geostatistics. Academic Press, London, UK.
- Kravchenko, A.N., Bullock, D.G., 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. Agron. J. 92, 75–83.
- Lamotte, M., Bruand, A., Dabas, M., Donfack, P., Gabalda, G., Hesse, A., Humbel, F.-X., Robain, H. (Eds), 1994. Distribution d'un Horizon à Forte Cohésion au Sein d'une Couverture de Sol Aride du Nord-Cameroun: Apport d'une Prospection Électrique. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Tome 318, série 2, Sciences de la Terre et des Planètes, Paris, France (in French).
- Lark, R.M., Bishop, T.F.A., 2007. Cokriging particle size fractions of the soil. Eur. J. Soil Sci. 58, 763–774.

Marcotte, D., 1991. Cokriging with Matlab. Comput. Geosci. 17, 1265–1280.

- Marion, G.M., Babcock, K.L., 1976. Predicting specific conductance and salt concentration in dilute aqueous solutions. Soil Sci. 122, 181–187.
- Marques da Silva, J.R., Peça, J.O., de Carvalho, M.J., Palma, P.M., 2008. Evaluation of spatial and temporal variability of pasture based on topography and the quality of the rainy season. Precis. Agr. 9, 209–229.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. Geoderma 117, 3–52.
- Moran, S., Fitzgerald, G., Rango, A.W., Althall, C., Barnes, E., Bausch, W., 2003. Sensor development and radiometric correction for agricultural applications. Photogramm. Eng. Rem. Sens. 69, 705–718.

- Pracilio, G., Adams, M.L., Smettem, K.R.J., Harper, R.J., 2006. Determination of spatial distribution patterns of clay and plant available potassium contents in surface soils at the farm scale using high resolution gamma ray spectrometry. Plant Soil 282, 67–82.
- Rhoades, J.D., Kaddah, M.T., Halvorson, A.D., Prather, R.J., 1977. Establishing soil electrical conductivity salinity calibration using four electrodes cells containing undisturbed soil cores. Soil Sci. 123, 137–141.
- Robertson, M.J., Wilford, J.R., Field, J.B., Greene, R.S.B., 2003. High-resolution ground based gamma-ray spectrometry and electromagnetics to assess regolith properties, Boorowa, NSW. In: Roach, I.C. (Ed), Advances in Regolith. Proceedings of the CRC LEME Regional Regolith Symposia. Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration, Bentley, Australia, pp. 352–357.
- Rossel, R.A.V., Taylor, H.J., McBratney, A.B., 2007. Geophysical tools and digital elevation models: Tools for understanding crop yield and soil variability. Eur. J. Soil Sci. 58, 343–353.
- Samouelian, A., Cousina, I., Tabbaghc, A., Bruandd, A., Richarde, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. Soil Till. Res. 83, 173–193.
- Savelieva, E., Demyanov, V., Kanevski, M., Serre, M., Christakos, G., 2005. BME-based uncertainty assessment of the Chernobyl fallout. Geoderma 128, 312–324.
- Sheldrick, B.H., Wang, C., Particle size distribution. In: Carter, M.R.E. (Ed), 1993. Soil Sampling and Methods of Soil Analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 499– 512.
- Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Kitchen, N.R., 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. Comput. Electron. Agr. 31, 239–264.
- Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Bollero, G.A., Bullock, D.G., Wiebold, W.J., 2003. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. Agron. J. 95, 472–482.
- Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Wiebold, W.J., Batchelor, W.D., Bollero, G.A., Bullock, D.G., 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. Comput. Electron. Agr. 46, 263–283.
- Taylor, M.J., Smettem, K., Pracilio, G., Verboom, W., 2002. Relationships between soil properties and high-resolution radiometrics, central eastern wheatbelt, western Australia. Explor. Geophys. 33, 95–102.
- Tiessen, H., Moir, J.O., 1993. Total and organic carbon. In: Carter, M.R., Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 187–199.
- Tourlière, B., Perrin, J., Le Berre P., Pasquet, J.F., 2003. Use of airborne gamma-ray spectrometry for kaolin exploration. J. Appl. Geophys. 53, 91–102.
- Triantafilis, J., Lesch, S.M., 2005. Mapping clay content variation using electromagnetic induction techniques. Comput. Electron. Agr. 46, 203–237.
- Tyler, A.N., 2004. High accuracy in situ radiometric mapping. J. Environ. Radioact. 72, 195–202.

- Van Meirvenne, M., Goovaerts, P., 2001. Evaluating the probability of exceeding a sitespecific soil cadmium contamination threshold. Geoderma 102, 75–100.
- Vitharana, U.W.A., Van Meirvenne, M., Simpson, D., Cockx, L., De Baerdemaeker, J., 2008. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. Geoderma 143, 206–215.
- Whelan, B.M., McBratney, A.B., 2000. The "null hypothesis" of precision agriculture management. Precis. Agr. 2, 265–279.
- Wilford, J., Minty, B., McBratney, A.B., Voltz, M., 2006. Chapter 16: The use of airborne gamma-ray imagery for mapping soils and understanding landscape processes. Dev. Soil Sci. 31, 207–218.
- Won, I.J., Keiswetter, D.A., Fields, G.R.A., Sutton, L.C., 1996. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor. J. Environ. Eng. Geophys. 1, 129–137.
- Wong, M.T.F., Asseng, S., Robertson, M.J., Oliver, Y., 2008. Mapping subsoil acidity and shallow soil across a field with information from yield maps, geophysical sensing and the grower. Precis. Agr. 9, 3–15.
- Zanolin, A., 2003. Irrigation de précision en Petite-Beauce: mesures au champ et modélisation stochastique spatialise e du fonctionnement hydrique et agronomique d'une parcelle de maïs. Ph.D. thesis, Université de Paris 6, France, 187 p.

	W1 Gamma- ray	W1 EM sensor
Explained variance (%)	84	96
Sand	0.37	-0.78
Silt	-0.33	0.76
Clay	-0.45	0.69
LogMO	0.52	0.03
Gamma total	-0.98	
К	-0.73	
Th	-0.45	
U	-0.14	
Th/K	-0.04	
U/Th	0.06	
U/K	0.05	
Ec1		038
Ec2		0.92
Ec3		0.98
Ec4		0.99

Table 1 Canonical correlations between the primary, secondary, and canonical variables (W1 and W2).

	Dir	ect	Z1Z2g	jamma	Z	Z1Z2 _{em}
	C0	C1	CO	C1	C0	C1
Clay	1.5	3.5	0	0.75	0	1.35
Sand	50	100	0	3.1	0	8.6
Silt	35	85	0	2.6	0	7.4
logMO	0.1	0.12	0.15	0.11	(0)	(0.02)
Z2 _{gamma}	0.52	0.64				
Z2 _{em}	0.01	0.97				

Table 2 Exponential variogram parameters. The covariate used is derived from the gamma-ray spectrometer ($Z2_{gamma}$) and electromagnetic sensor ($Z2_{em}$). The range was fixed to 200 m for all variogram models. Use of $Z1Z2_{em}$ values are subject to caution (see the results section).

Notes: logMO = logarithm of the soil organic matter content; C0 = nugget; C1 = sill.

· .	Cokriging							Ordinary kriging				
	Gam	ma-ray	spectro	ometer	EM sensor							
	Sand	Clay	Silt	log MO	Sand	Clay	Silt	logMO	San d	Cla y	Silt k	ogMO
R	0.71	0.54	0.7	0.72	0.79	0.66	0.77	0.41	0.73	0.5 1	0.71	0.4 1
MAE	6.7	1.37	5.89	0.22	5.93	1.26	5.31	0.29	8.6	2	7.75	0.2 8
Gain	3	6.7	6.6	3.5	4.2	7.9	8.7	0				

Table 3 Estimation errors associated with the interpolation of the granulometric soil fractions. Results are from cross-validation procedures.

Notes: logMO = logarithm of the organic matter content; R = Pearson correlation coefficient calculated between the predicted and observed litter thickness values; MAE = mean absolute errors of estimations. The gain expressed as a percentage is the difference of MAE obtained with the cokriging and the ordinary kriging divided by the mean of the primary variable.



Fig. 1. Relationship between the organic matter content and the primary and secondary variables. The logarithm of the organic matter content is plotted against the higher EM frequency (25410 Hz) and the total gamma-ray counts registered by the spectrometer.



Fig. 2. Experimental variograms and associated exponential models for the organic matter cokriged with a covariate derived from the gamma-ray spectrometer (upper) and the electromagnetic sensor (lower). Z1 and Z2 are the direct variograms of the primary and secondary variables, respectively. Z1Z2 is the cross-variogram.



Fig. 3. Soil organic matter content. Interpolations are made using a composite covariate derived from the gamma-ray spectrometer (right), electromagnetic sensor (center), and primary variable alone (left).

Annexe V

Publication 2

L'INRS ne détient pas les droits pour diffuser cette version de l'article. Vous pouvez le consulter à l'adresse suivante :

Aznar, J.C., Paucar-Munoz, H., Richer-Laflèche, M. and Bégin, Y. (2010) Field litter thickness assessed by gamma-ray spectrometry. *Forest Ecol. Manag.* **260**, 0378-1127. <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.022</u>



Annexe IV

Affiche présentée lors du congrès annuel de l'association québécoise les spécialistes en sciences du sol (AQSSS) tenu à Oka du 1^{er} au 3 juin 2010





Paucar, H., Aznar, J.-C., Laflèche, M., Nolin, M. Spatial interpolation of soil characteristics using gamma ray spectrometers and electromagnetic sensors as secondary information. In prep.

