

**Cartographie à l'échelle de la parcelle agricole
de variables indicatrices de la capacité des sols à fixer le phosphore
à l'aide de la télédétection et des nouvelles technologies.**

Par
Mathieu Quenum

Thèse présentée à
l'Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement
(INRS – ETE)
pour l'obtention
du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.)



Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau, Terre et Environnement
(INRS-ETE)

**CARTOGRAPHIE À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE AGRICOLE
DE VARIABLES INDICATRICES DE LA CAPACITÉ DES SOLS À FIXER
LE PHOSPHORE À L'AIDE DE LA TÉLÉDETECTION ET
DES NOUVELLES TECHNOLOGIES**

Par
Mathieu Quenum

Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophae Doctor (Ph. D.) en science de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur interne:	Dr André Saint-Hilaire Institut National de la recherche Scientifique Centre Eau, Terre & Environnement Québec, (QC), canada
Examineur externe:	Dr Georges Gangbazo Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs Direction des politiques en milieu terrestre Québec (QC), Canada
Présidente de jury et examinatrice externe :	Dr Athyna Cambouris, Agriculture et Agroalimentaire Canada Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures
Codirecteur de recherche :	Dr Monique Bernier Université du Québec Institut National de la recherche Scientifique Centre Eau, Terre et Environnement Québec, (QC), Canada
Codirecteur de recherche :	Dr Michel C. Nolin Agriculture et Agroalimentaire Canada Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures
Directeur de recherche :	Dr Daniel Cluis Université du Québec Institut National de la recherche Scientifique Centre Eau, Terre et Environnement (Québec)

DÉDICACE

Je dédie cette thèse à

Mon frère Guy Julien Comlan

Ma sœur Marcelle Angèle Assiba

Mon frère Didier François de Paul*

Ma sœur Isabelle

Ma sœur Lydia

Mon frère Joseph

Mon frère Jérémie

Ma fille Noémie Jasmine

Mes parents Marie et Généreux

Ma tante Mamavi Houenssi

« Au nom de l'Amour qui nous a nourri, soutenu et soudé et qui continue de nous faire grandir ».

« L'unique source de savoir réside dans la vérité et l'homme en est le miroir ».

Paul Twitchell

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon Maître et guide scientifique **Dr Michel C. Nolin**. Par cette expérience scientifique précieuse, j'ai pu réaliser que même sur le plan physique et dans n'importe quelle discipline, on a toujours besoin d'un guide. Dr Nolin, je tiens du fond de mon cœur à vous remercier de m'avoir accueilli dans votre laboratoire et de m'avoir initié à la géostatistique, discipline scientifique très intéressante que je ne connaissais pas et que j'ai appris à aimer. Comme un bon maître sait guider son disciple, vous avez su me soutenir pas à pas à travers mes moments les plus difficiles. Les mots me manquent pour vous témoigner toute ma gratitude et mes remerciements infinis. Merci également d'avoir accepté de codiriger cette thèse en laquelle vous avez toujours cru. Soyez rassuré que j'ai appris lentement mais sûrement et que toutes les connaissances scientifiques que vous m'avez transmises restent gravées en moi, et j'espère pouvoir les transmettre et les partager avec d'autres tout en continuant d'apprendre. Je salue votre rigueur scientifique et votre amour pour un travail toujours bien fait.

Je tiens à remercier mon professeur et co-directrice, **Dr Monique Bernier**. Merci d'avoir accepté de codiriger cette thèse avec spontanéité. Merci pour toutes les fois que votre compréhension, votre écoute et votre soutien m'ont permis de garder espoir et de tenir le cap.

Je veux remercier mon directeur de thèse, **Dr Daniel Cluis** pour avoir accepté de diriger cette recherche. Monsieur Cluis, je vous remercie beaucoup pour votre soutien financier, votre soutien moral et aussi pour toute la rigueur que vous vous avez maintenu tout au long de ma scolarité.

Je remercie **Dr Athyna Cambouris** pour toute son aide, sa formation, le temps consacré à mon encadrement et à ma formation scientifique et tous ses conseils d'encouragement tout au long de mon séjour au sein de l'équipe des laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Dr Cambouris, merci d'avoir accepté de lire, de juger cette thèse et d'avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Je veux remercier **Dr Georges Gangbazo** pour m'avoir soutenu moralement pendant mes périodes creuses, pour m'avoir prodigué des conseils tout au long de ma scolarité. Merci beaucoup d'avoir été là à tout moment et d'avoir accepté de lire et de juger ce travail avec une rigueur scientifique. Vos commentaires et corrections ont été grandement appréciés.

Je remercie mon professeur **Dr André St Hilaire** d'avoir accepté de lire et de juger ce travail avec une rigueur scientifique. Merci pour vos commentaires et suggestions.

Remerciements sincères à tout le personnel de l'équipe des laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision, particulièrement à MM. **André Martin** et **Mario Deschênes** pour le partage de leur excellente expérience en pédologie sur le terrain ainsi qu'à tous les étudiants diplômés et stagiaires (**Michel Breton, Jean-Daniel Sylvain, Simon Perreaut, Mohamed Abou Niang**).

Merci à Mme **Suzanne Dussault** de l'INRS-ETE.

Merci à tous mes amis qui de près ou de loin m'ont soutenu dans ce projet, particulièrement à **Yvette Sylvain**, à **Denise Gagné** et **Jacques Guyon**, à **Abéna Atakoussi** et **Jean-François Bonbhel**, à **Jornette Dangbédji** pour leur amitié et leur soutien.

RÉSUMÉ

Cette thèse vise à cartographier des indicateurs de la capacité de fixation du phosphore (CFP) des sols à l'échelle de la parcelle agricole ainsi qu'à stratifier les parcelles en zones d'aménagement (ZA) aux propriétés pédologiques suffisamment homogènes pour y implanter une gestion spécifique et rationnelle du phosphore sous forme d'engrais minéral, de fumier ou de lisier. Pour se faire, elle évalue l'utilité des données de conductivité électrique apparente du sol (CEA), des modèles numériques d'élévation (MNE) de haute précision et des données spectrales extraites d'images satellitaires et aéroportées. L'étude s'est déroulée sur trois parcelles contiguës, totalisant 15,75 hectares, sous culture (rotation) de fourrage, céréale, maïs et soya, situées dans le bassin versant du Bras d'Henri, dans la région de Chaudière-Appalaches.

Dans un premier temps, ces parcelles ont fait l'objet d'une cartographie très détaillée des sols à l'échelle de 1 :10 000 avec description de profils pédologiques (1m). Puis, un échantillonnage de la couche de surface (0-20 cm) de chacun des champs a été effectué au printemps 2005, à l'aide d'une grille non alignée de 30 m par 30 m (n=164, 11 échantillons par ha). Les échantillons ont été séchés à la température ambiante et analysés afin de déterminer les principales propriétés physico-chimiques des sols : sable, limon, argile, matière organique, pH, éléments extraits à la solution Mehlich-3 (M-3), soit CaM-3, MgM-3, KM-3, PM-3, AIM-3 et FeM-3. Les teneurs en oxydes de fer (Feox) et d'aluminium (Alox) extraits à l'oxalate acide d'ammonium ont aussi été mesurées. L'indice de sorption du phosphore (PSI) a été mesuré. La CFP des sols, définie comme le pouvoir d'un sol à retenir une quantité de phosphore selon divers mécanismes physico-chimiques, a été estimée à partir de quatre indicateurs : AIM-3, AIM-3+FeM-3, Alox+Feox et PSI. Enfin, l'indice de saturation en phosphore (Psat) du sol a été déterminé à partir du rapport PM-3/AIM-3.

Dans un deuxième temps, une série de variables auxiliaires ont été mesurées sur les trois parcelles à l'étude. La CEA du sol a été mesurée en mode continu le long de transects parallèles à la longueur des champs (7 m x 3 m) avec la technologie VERIS 3100 pour une profondeur de 0-30 et 0-100 cm simultanément, de même qu'avec la technologie Geonics EM 38 pour une profondeur de 0-130 cm. Un MNE de haute précision (1-2 cm en mode horizontal et de 2-5 cm en mode vertical) a été réalisé pour ces parcelles à l'aide d'un système de positionnement par

satellite RTK (*Real Time Kinematic*) Trimble 5800 le long des mêmes transects. Quelques paramètres topographiques (pente et indice d'humidité de surface) ont été générés à partir de ce MNE.

Deux images optiques ASTER (15 m de résolution spatiale au sol pour les trois bandes dans le vert, rouge et proche infrarouge) du satellite TERRA ont été acquises, respectivement aux printemps 2000 et 2005. Des images aéroportées multispectrales (trois bandes dans le vert, rouge et proche infrarouge) ont été acquises au printemps 2004, à une résolution spatiale de 1 m au sol, par une équipe de recherche appliquée de l'Institut de technologie agricole et alimentaire (ITAA) de La Pocatière (Québec). Enfin, une image IKONOS (quatre bandes dans le bleu, vert, rouge et proche infrarouge) a également été acquise au printemps 2008 à une résolution spatiale de 4 m au sol. Après avoir apporté les corrections radiométriques et géométriques (à l'exception des images aéroportées), ces images, qui couvraient l'ensemble des champs étudiés, ont été intégrées dans un système d'information géographique (ArcGIS de ESRI, 2003) avec les couches d'informations sur les sols pour y réaliser les analyses spatiales et géostatistiques (module *Geostatistical Analyst*) requises pour l'atteinte des objectifs de recherche.

La variabilité spatiale inter- et intra-parcellaire des indicateurs de la CFP a d'abord été étudiée en comparant les trois champs à l'aide d'un test statistique de comparaison multiple (Scheffé) effectué sur les indicateurs. Par la suite, une étude variographique a été réalisée afin d'examiner quelques paramètres (i.e. portée : A_0 , pépite : C_0 , plateau : C_0+C et ratio : C/C_0+C) des semi-variogrammes utilisés pour déceler la présence dans les parcelles de structures spatiales pour chacun des indicateurs de la CFP. Les résultats de cette analyse ont montré que AIM-3 était l'indicateur de CFP qui présentait les structures spatiales les mieux définies (ratio C/C_0+C le plus élevé), conditions essentielles à la cartographie numérique de la CFP à l'échelle de la parcelle. Toutefois, chacun des quatre indicateurs étudiés présentaient aussi des structures spatiales permettant de réaliser leur prédiction par interpolation spatiale à l'aide du krigeage. L'indicateur AIM-3, propriété régulièrement utilisée dans les laboratoires de fertilité des sols pour établir les recommandations pour la gestion du P ainsi que pour établir les PAEF, était également, avec AIM-3+FeM-3, un des indicateurs de la CFP présentant une erreur standard de l'interpolation (ESM) parmi les plus faibles des indicateurs étudiés, soit $ESM = 265 \text{ mg kg}^{-1}$, ce qui correspond à une précision de 16% de la valeur moyenne du champ (1618 mg kg^{-1}). Ceci indique une précision et une fiabilité assez bonnes des cartes de CFP générées par interpolation

spatiale, bien que ESM correspond à plus d'une demie classe de CFP (1 classe = 500 mg kg⁻¹, soit : >1000; 1100-1600; >1600 mg kg⁻¹) telle que spécifiée dans le guide de fertilisation en usage au Québec. Dans la plupart des cas, l'approche anisotrope permet de réduire ESM (v.g. pour AIM-3, 253 mg kg⁻¹). Le cokrigage avec les variables auxiliaires ne permet pas de réduire sensiblement ESM. Seul, la CEA mesurée avec le Geonics EM-38 (0-130 cm) avec co-krigeage isotrope permet de réduire ESM à 215 mg kg⁻¹ de même que la CEA mesurée avec le VERIS 3100 à une profondeur de 0-30 cm (ESM = 245 mg kg⁻¹) en cokrigage anisotrope. La précision atteinte n'est pas appropriée pour supporter une gestion spécifique du P en mode continu. Une gestion par zone d'aménagement, bien que moins précise, nous apparaît plus appropriée.

Dans un troisième temps, nous avons étudié l'impact de la stratégie d'échantillonnage (variation du nombre et de la densité d'échantillons) sur ESM lors de la cartographie numérique de AIM-3 à l'aide du krigeage simple et du cokrigage (utilisation de variables auxiliaires). Les résultats de cette étude ont montré qu'en réduisant le nombre d'échantillons, que c'est encore une fois le Geonics EM 38 qui a permis de réduire le plus l'erreur standard d'interpolation avec une approche de cokrigage anisotrope. Quelle que soit la variable auxiliaire utilisée pour le cokrigage, une densité optimale d'échantillonnage de 5,2 échantillons à l'hectare est requise pour cartographier la CFP en prenant AIM-3 comme indicateur. Avec moins d'échantillons, l'erreur augmente drastiquement, alors que plus d'échantillons n'améliorent pas beaucoup la précision de l'interpolation. Cette densité correspond à une taille de 82 échantillons pour 15,75 ha. Le coût associé à cette densité d'échantillonnage est beaucoup trop élevé et n'est pas acceptable dans le contexte agro-économique actuel du type de production agricole pratiquée (ferme mixte : laitière et porcine) dans cette région. Ces résultats supportent également l'utilisation d'une approche de gestion spécifique du P par zone d'aménagement basée sur la CFP et délimitée à partir de variables auxiliaires densément mesurées.

L'étude menée dans un quatrième temps consistait donc à déterminer le nombre optimal de zones d'aménagement à définir dans les trois parcelles étudiées pour supporter ce type de gestion spécifique ainsi qu'à évaluer l'efficacité de différentes stratégies de stratification. Pour atteindre cet objectif, le logiciel *Management Zone Analyst* (MZA) développé par un groupe de chercheurs de l'université du Missouri, U.S.A., a été utilisé pour stratifier les parcelles à partir de différentes combinaisons de variables auxiliaires (stratégies de stratification) et pour évaluer le nombre optimal de ZA à considérer dans ces trois parcelles. La stratification des parcelles

avec MZA fonctionne à partir d'un algorithme de classification floue (*Fuzzy c-means*) et trois mesures de similarité, dont la distance de Mahalanobis qui a été utilisée dans la présente étude car elle était la mieux adaptée au jeu de données utilisées (absence de multicolinéarité). La décision concernant le nombre optimal de ZA à considérer était basée sur l'analyse de plusieurs critères dont le plus important est le pourcentage de réduction de la variance (RV) des variables auxiliaires utilisées pour la stratification ainsi que la RV des quatre indicateurs de la CFP utilisées dans cette étude (validation agronomique de la procédure de cartographie). Toutes les variables auxiliaires évaluées étaient associées à l'élévation extraite du MNE car cette mesure imposait une certaine contrainte de proximité lors du processus de stratification et constitue une donnée très utile à intégrer dans la gestion spécifique des parcelles pour planifier le nivellement et les travaux d'amélioration du drainage des terres. Quelle que soit la combinaison des variables auxiliaires utilisée, une stratification des parcelles en deux zones entraîne généralement la plus grande RV, ce qui constitue le nombre minimal de ZA à considérer. Une réduction supplémentaire de la variance est obtenue en considérant cinq ZA, ce qui constitue le nombre maximum de ZA à considérer. Un autre critère important dans le choix du nombre de ZA à considérer est que les zones délimitées doivent être significativement différentes les unes des autres quant à leur CFP, tel que diagnostiqué à partir d'un test de comparaison multiple de Scheffe appliqué sur les quatre indicateurs de la CFP, ainsi que sur PM-3 et Psat, deux propriétés de sol fréquemment utilisés dans les recommandations de P et dans l'évaluation des risques de pertes de P à l'environnement. Ainsi, au maximum, trois ZA se sont avérées significativement différentes les unes des autres pour les indicateurs AIM-3, AIM-3+FeM-3 et Alox+Feox tandis que seulement deux zones ont été identifiées dans le cas de PSI, de PM-3 et de Psat. Parmi toutes les variables auxiliaires utilisées avec l'élévation pour la stratification des parcelles, c'est la CEA mesurée avec le VERIS 3100 (0-100 cm) ainsi que l'indice de végétation ajusté aux sols (SAVI) généré par krigeage à partir de l'information spectrale de l'image IKONOS qui ont entraîné la plus grande RV des indicateurs de la CFP. Ainsi, en stratifiant les parcelles en deux ZA avec la CEA mesurée avec EM-38 et l'élévation, la variance de AIM-3 a été réduite à 55% de la variance mesurée pour l'ensemble du champ. Avec cinq ZA, la variance de AIM-3 est réduite à 45%, soit un gain de 10%. C'est Alox+Feox qui bénéficie le plus de la stratification car la variance de cet indicateur de la CFP est réduite à 35% pour 2 ZA et à 25% pour 5 ZA.

Les trois ZA délimitées avec le VERIS 3100 (0-100 cm) et l'élévation présentaient des caractéristiques et des comportements contrastants. Ainsi, la ZA présentant la CFP la plus élevée présentait une valeur moyenne de 1928 mg kg⁻¹ (forte) pour l'indicateur AIM-3 et un Psat de 7.1 %. La seconde avait une teneur moyenne en AIM-3 de 1466 mg kg⁻¹ (moyenne) et un Psat de 10.5 % alors que la troisième ZA avait une teneur moyenne en AIM-3 de 1197 mg kg⁻¹ (faible à moyenne) et un Psat de 15.8 % selon le guide de référence en fertilisation en usage au Québec. D'un point de vue environnemental, un zonage permettrait une gestion spécifique et rationnelle du phosphore apporté par des engrais minéraux et organiques (fumier et lisier) en fonction de la CFP, de la richesse de chaque zone en P (PM-3) et de Psat, tout en tenant compte de la vulnérabilité des sols au ruissellement, à l'érosion et au lessivage de N ainsi qu'en fonction des cultures à implanter et des précédents culturaux. Les parcelles présentant une pédodiversité modérée à élevée comme celles que nous avons étudiées bénéficieraient d'une stratification en zones de sols homogènes.

La contribution principale de cette étude est d'avoir proposé une nouvelle méthode de cartographie à l'échelle de la parcelle agricole de quelques indicateurs de la CFP. Ceci contribuera, de manière notable, à apporter diverses solutions locales au problème de pollution de l'environnement par le phosphore d'origine agricole en rationalisant les épandages de fumier et lisier selon la CFP et le taux de saturation en P des sols. Les résultats de cette recherche contribuent également à démontrer l'utilité de la télédétection et des nouvelles technologies dans le domaine de la cartographie numérique des sols.

2.10	Problématique du coût d'échantillonnage et les variables auxiliaires	24
2.10.1	<i>La conductivité électrique apparente (CEA)</i>	25
2.10.2	<i>Les modèles numériques d'élévation (MNE)</i>	26
2.11	La télédétection et ses origines	26
2.12	Télédétection et spectre de réflectance des sols	28
2.13	Télédétection et science du sol	29
2.14	Le spectre électromagnétique : un bref aperçu	33
2.15	Caractéristiques des principaux capteurs satellitaires disponibles actuellement	35
2.16	Les caractéristiques des capteurs ASTER et IKONOS	36
2.16.1	<i>ASTER</i>	36
2.16.3	<i>IKONOS-2</i>	38
3.	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	39
3.1	Cadre du projet de recherche	39
3.1.1	<i>Contexte de l'étude</i>	39
3.1.2	<i>Localisation et description du site à l'étude</i>	39
3.1.3	<i>Conditions climatiques de la région</i>	42
3.1.4	<i>Problématique agro-environnementale de la région</i>	42
3.1.5	<i>Conditions pédologiques et topographiques du bassin versant du Bras d'Henri</i>	43
3.1.6	<i>Conditions pédologiques particulières des trois parcelles étudiées</i>	44
3.2	Méthodologie d'échantillonnage et d'analyse des sols	48
3.2.1	<i>Stratégie d'échantillonnage des sols</i>	48
3.2.2	<i>Analyses physiques et chimiques des sols</i>	48
3.2.3	<i>Degré de saturation en phosphore</i>	49
3.3	Mesure et cartographie des variables auxiliaires	49
3.3.1	<i>Mesure de la conductivité électrique apparente</i>	49
3.3.2	<i>Le modèle numérique d'élévation (MNE)</i>	51
3.3.3	<i>Acquisition d'images satellitaires et aéroportées</i>	54
3.3.3.1	<i>Les images ASTER</i>	54
3.3.3.2	<i>L'image IKONOS</i>	54
3.3.3.3	<i>Acquisition d'images multispectrales aéroportées</i>	55

3.3.4	<i>Prétraitement des images satellitaires</i>	56
3.3.4.1	<i>Correction radiométrique</i>	56
3.3.4.2	<i>Correction géométrique</i>	58
3.3.5	<i>Calcul des indices spectraux pour l'image IKONOS</i>	59
3.4	Analyses statistiques et spatiales des données.....	61
3.4.1	<i>Système d'information géographique</i>	61
3.4.2	<i>Analyses statistiques</i>	61
3.4.3	<i>Analyses géostatistiques</i>	62
3.4.3.1	<i>Variographie, krigeage et co-krigeage</i>	62
3.4.3.4	<i>La validation-croisée</i>	65
3.4.4	<i>Évaluation de l'efficacité de la stratégie d'échantillonnage des sols</i>	68
3.4.5	<i>Méthodologie utilisée pour évaluer l'efficacité de la stratification des parcelles en zones d'aménagement</i>	71
3.5	Schéma récapitulatif de la méthodologie de recherche	75
4.	DESCRIPTION DE LA VARIABILITÉ SPATIALE INTER ET INTRA PARCELLAIRE DE LA CAPACITÉ DE FIXATION DU PHOSPHORE DES SOLS	77
4.1	Comparaison des variables et champs étudiés à partir de quelques paramètres statistiques classiques (test de normalité, moyenne et du coefficient de variation)	77
4.2	Paramètres de semivariogramme pour l'évaluation de la présence de structure spatiale des indicateurs de la CFP	84
4.3	Corrélations entre les indicateurs de la CFP et les variables auxiliaires	88
4.3.1	<i>Analyse des structures spatiales des variables auxiliaires</i>	91
4.4	Qualité de l'interpolation spatiale par krigeage et co-krigeage.....	92
4.5	Conclusion.....	106
5.	ÉTUDE DE LA STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA CFP	107
5.1	Variabilité intraparcellaire et stratégie d'échantillonnage dans les champs agricoles.....	108
5.2	Krigeage simple.....	109
5.3	Co-krigeage	113

5.3.1	<i>Cas du Geonics EM-38 (CEA à 130 cm)</i>	113
5.4	Discussion et conclusion	117
6.	LES ZONES D'AMÉNAGEMENT	119
6.1.	Détermination du nombre optimum de zones d'aménagement dans les trois champs agricoles du bassin versant du Bras d'Henri.	122
6.2.	Comparaison des ZA selon la valeur moyenne des indicateurs de la CFP (analyse de variance)	138
6.3.	Conclusion.....	151
7.	CONCLUSION GENERALE	155
	PERSPECTIVES ET NOUVELLES AVENUES DE RECHERCHE	159
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	163
	ANNEXE	191

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Semi-variogramme théorique (modèle sphérique) (Source : Provencher, 2003).....	17
Figure 2 : Le spectre de toutes les ondes électromagnétiques.	34
Figure 3 : Les différentes régions du spectre électromagnétique.....	34
Figure 4 : Représentation détaillée de la région spectrale du visible.....	34
Figure 5 : Localisation du Bras d'Henri (encerclée en rouge) dans l'une des trois zones physiographiques du bassin versant de la rivière Chaudière, soit basse, moyenne et haute Chaudière (Source : www.mddep.gouv.qc.ca , 2007).....	40
Figure 6 : Localisation du bassin versant du Bras d'Henri, des deux microbassins expérimentaux et des trois zones physiographiques : Appalaches, Piemont et Plaines (Source : Perron, 2005).....	41
Figure 7 : Cartes pédologiques très détaillées des trois parcelles à l'étude (Bossé, 2007).....	45
Figure 8 : Localisation des parcelles et dispositif d'échantillonnage des sols utilisé.	48
Figure 9 : Illustration de la procédure de mesure de la conductivité électrique apparente des sols avec le Geonics EM-38 jumelée à un DGPS.	50
Figure 10 : Illustration de la procédure de mesure de la conductivité électrique apparente des sols avec l'appareil VERIS 3100 jumelée à un DGPS.....	51
Figure 11 : Illustration de l'équipement et de la stratégie de mesure utilisés pour réaliser le relevé topographique de précision avec un système RTK Trimble 5800 : unité mobile et unité fixe.....	53
Figure 12 : Modèle numérique d'élévation réalisé dans le microbassin d'intervention du Bras d'Henri à l'aide d'un système RTK Trimble 5800 (Source : Ka <i>et al.</i> , 2006).....	53
Figure 13 : Images ASTER couvrant le bassin versant du Bras d'Henri acquises le 23 juin 2000 (à gauche) et le 03 juin 2005 (à droite).....	54

Figure 14 :	Image IKONOS acquise le 13 mai 2008 au-dessus de la partie nord du bassin versant du Bras d'Henri, près des deux microbassins expérimentaux.	55
Figure 15 :	Mosaïque produite à partir des images multispectrales aéroportées acquises le 12 mai 2004 au-dessus de la partie nord du bassin versant du Bras d'Henri, près des deux microbassins expérimentaux.....	56
Figure 16 :	Ajustement du modèle du semivariogramme avec le module <i>Geostatistical Analyst</i> (<i>ArcGIS</i>).....	63
Figure 17 :	Nombre de points voisins pris en compte pour l'interpolation du point mesuré....	64
Figure 18 :	Étape de validation croisée.....	65
Figure 19 :	Répartition des points d'échantillonnage à l'intérieur des trois champs à l'étude selon différentes densités (n) et stratégies (échantillonnage systématique par grille non alignée) de sélection.....	70
Figure 20 :	Exemple de fichier de sortie du logiciel MZA illustrant le nombre de zones délimitées et la classification spécifique de chaque pixel du champ étudié.....	73
Figure 21 :	Diagramme illustrant la procédure de traitement et d'analyse de l'information (variables auxiliaires) et de délimitation des zones d'aménagement dans le logiciel MZA (Adapté de Fridgen <i>et al.</i> , 2004).....	74
Figure 22 :	Schéma synoptique de la méthodologie de cartographie des indicateurs de la CFP.....	76
Figure 23 :	Comparaison des trois champs à l'étude selon le test de Scheffé effectué sur les indicateurs de la CFP.	79
Figure 24 :	Carte numérique de la CFP des sols des 3 champs à l'étude générée par co-krigeage à partir des données de la CEA mesurée à 130 cm avec le Geonics EM 38 a) 164 points de la grille d'échantillonnage (100%, ESM= 215 mgkg ⁻¹); b) 110 points de la grille d'échantillonnage (66%, ESM = 217 mg kg ⁻¹) et c) 21 points de la grille d'échantillonnage (13%, ESM = 245 mg kg ⁻¹)	99

Figure 25	Cartographie de la CFP (AIM3 mg kg ⁻¹) selon la densité de'échantillonnage (n=21 éch. ha ⁻¹).....	102
Figure 26 :	Cartographie de la CFP (AIM3 mg kg ⁻¹) selon la densité de'échantillonnage (n=110 éch. ha ⁻¹).....	103
Figure 27 :	Cartographie de la CFP (AIM3 mg kg ⁻¹) selon la densité de'échantillonnage (n=164 éch. ha ⁻¹).....	104
Figure 28 :	Illustration des superficies occupées par les classes de CFP (AIM3 mg kg ⁻¹) selon les densités a, b et c.....	105
Figure 29 :	Variation de l'erreur standard.moyenne (ESM) selon la densité d'échantillonnage et la taille de l'échantillon pour une interpolation par krigeage simple (approche isotrope).	111
Figure 30 :	Variation de l'erreur standard.moyenne (ESM) selon la densité d'échantillonnage et la taille de l'échantillon pour une interpolation par krigeage (approche anisotrope).	113
Figure 31 :	Variation de l'erreur standard.moyenne (ESM) selon la densité d'échantillonnage et la taille de l'échantillon pour une interpolation par co-krigeage avec la CEA mesurée avec le Geonics EM-38 à 130 cm (approche isotrope).....	115
Figure 32 :	Variation de l'erreur standard.moyenne (ESM) selon la densité d'échantillonnage et la taille de l'échantillon pour une interpolation par co-krigeage avec la CEA mesurée avec le Geonics EM-38 à 130 cm (approche anisotrope).	116
Figure 33 :	Cartes des variables utilisées comme intrants au logiciel MZA pour la stratification des parcelles en zones d'aménagements.	121
Figure 34 :	Variation des indices de performance de la stratification des parcelles (FPI et NCE) selon le nombre de zones d'aménagement délimitées à partir des données d'élévation de haute précision (DGPS-RTK) et de conductivité électrique apparente des sols acquises avec le Geonics EM-38 ou le VERIS 3100.	125

Figure 35 : Variation des indices de performance de la stratification des parcelles (FPI et NCE) selon le nombre de zones d'aménagement délimitées à partir des données d'élévation de haute précision (DGPS-RTK) et des informations multispectrales obtenues à partir d'une image IKONOS acquise au printemps 2008.	126
Figure 36 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (conductivité électrique apparente mesurée avec le Geonics EM-38 et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.	130
Figure 37 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS 3100 (0-30 cm) et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.....	131
Figure 38 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS 3100 (0-100 cm) et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.....	132
Figure 39 : Réduction de la variance des trois variables auxiliaires (conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS 3100 (0-30 et 0-100 cm) et élévation) utilisées pour la stratification (a-c) et des quatre indicateurs de la CFP (d-g) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.....	133
Figure 40 : Réduction de la variance des quatre variables auxiliaires (bandes spectrales d'une image IKONOS) utilisées pour la stratification (a-d) et des quatre indicateurs de la CFP (e-h) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.....	134
Figure 41 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (bande proche-infrarouge d'une image IKONOS et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.....	135

Figure 42 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (indice SAVI extrait d'une image IKONOS et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.....	136
Figure 43 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (indice SAVI généré par krigeage simple anisotrope à partir d'une image IKONOS et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.....	137
Figure 44 : Cartes des zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir de la conductivité électrique, de l'élévation et du logiciel MZA.....	141
Figure 45 : Cartes des zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir des images IKONOS, de l'élévation et du logiciel MZA.	142

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Valeur de portée mesurée pour le P dans différentes études (adapté de Gassner et Schnug, 2003).	15
Tableau 2 :	Classes d'intensité de la variabilité (Source : Nolin <i>et al.</i> , 1997)	18
Tableau 3 :	Compilation dans la littérature de propriétés physico-chimiques de sol prédites à l'aide de la télédétection.....	31
Tableau 4 :	Compilation dans la littérature de plateformes, types de senseurs et régions spectrales utilisés pour la prédiction de propriétés de sol à l'aide de la télédétection.....	32
Tableau 5 :	Revue de littérature comparant l'efficacité de prédiction (R^2) de quelques propriétés de sol reliées à la CFP ainsi que la région spectrale utilisée dans l'ultraviolet (UV), le visible, (VIS), le proche infrarouge (PIR), et le moyen infrarouge (MIR)	33
Tableau 6 :	Region spectrale des bandes du capteur ASTER.....	37
Tableau 7 :	Caractéristiques principales du radiomètre du satellite IKONOS-2.....	38
Tableau 8 :	Principales caractéristiques des sept séries de sols retrouvées dans les trois parcelles à l'étude.	46
Tableau 9 :	Distribution spatiale (% de la superficie totale) des classes de sols identifiées dans les parcelles à l'étude (Bossé. 2007).	47
Tableau 10 :	Paramètres d'acquisition et de correction radiométrique de l'image IKONOS	58
Tableau 11 :	Paramètres statistiques décrivant les champs et les variables à l'étude.	81
Tableau 12 :	Paramètres géostatistiques des modèles théoriques isotropes ajustés aux semivariogrammes expérimentaux pour chaque variable et chaque champ.....	85
Tableau 13 :	Paramètres géostatistiques des modèles théoriques anisotropes ajustés au semivariogrammes expérimentaux pour chaque variable et chaque champ.....	86

Tableau 14 :	Corrélation de Pearson entre les indicateurs de la CFP et les variables auxiliaires	90
Tableau 15 :	Ratio des variables auxiliaires utilisées dans l'étude	92
Tableau 16 :	Paramètres statistiques décrivant la qualité de l'interpolation spatiale des indicateurs de la CFP au moyen d'un krigeage simple isotrope.....	94
Tableau 17 :	Paramètres statistiques décrivant la qualité de l'interpolation spatiale des indicateurs de la CFP au moyen d'un krigeage simple anisotrope.....	95
Tableau 18 :	Paramètres statistiques décrivant la qualité de l'interpolation spatiale de Al_{M-3} ($mg\ kg^{-1}$) par krigeage simple et co-krigeage à partir de variables auxiliaires (approche isotrope).	96
Tableau 19 :	Paramètres statistiques décrivant la qualité de l'interpolation spatiale de Al_{M-3} ($mg\ kg^{-1}$) par krigeage simple et co-krigeage à partir de variables auxiliaires (approche anisotrope).	97
Tableau 20 :	Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) d'interpolation par krigeage simple de Al_{M-3} en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).....	110
Tableau 21 :	Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) d'interpolation par krigeage simple de Al_{M-3} en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).....	112
Tableau 22 :	Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la conductivité électrique apparente mesurée à 130 cm avec le Geonics EM-38 en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).	114
Tableau 23 :	Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la conductivité électrique apparente mesurée à 130 cm avec le Geonics EM-38 en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope)	116

Tableau 24 :	Bilan de l'étude de la stratégie d'échantillonnage selon diverses stratégies d'interpolation spatiale de Al_{M-3} , indicateur de la CFP	118
Tableau 25 :	Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du phosphore selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et la conductivité électrique apparente des sols mesurée avec le Geonics EM-38	143
Tableau 26 :	Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et la conductivité électrique apparente des sols mesurée avec le VERIS (0-100 cm)	144
Tableau 27 :	Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et la conductivité électrique apparente des sols mesurée avec le VERIS (0-30 cm)	145
Tableau 28 :	Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et la conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS (0-30 et 0-100 cm)	146
Tableau 29 :	Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et des bandes spectrales bleu, vert, rouge et proche infrarouge d'une image IKONOS	147
Tableau 30 :	Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et de l'indice SAVI calculé à partir des bandes spectrales d'une image IKONOS	148
Tableau 31 :	Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à	

partir de l'élévation et de l'indice SAVI issu d'une image IKONOS après krigeage simple anisotrope. 149

Tableau 32 : Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et de la bande spectrale du proche infrarouge d'une image IKONOS. 150

1. INTRODUCTION

1.1 Problématique du phosphore en milieu agricole

Le phosphore est un élément essentiel à la croissance des plantes, mais son excès contribue à la pollution de l'environnement par le biais de l'eutrophisation des eaux de surface. L'eutrophisation est caractérisée par la prolifération d'algues et d'autres végétaux et constitue une sérieuse menace pour l'environnement car elle réduit les usages de l'eau. Les sources de phosphore dans les eaux de surface proviennent d'une part de processus naturels comme l'érosion, le ruissellement et l'infiltration. Ces processus naturels sont parfois amplifiés par des activités agricoles, industrielles et municipales. Plusieurs études ont mis en évidence la contribution majeure de l'agriculture à l'eutrophisation, les autres activités étant actuellement contrôlées par des mesures d'assainissement et des objectifs environnementaux de rejet dans les cours d'eau.

Les solutions au problème du phosphore peuvent être envisagées globalement ou localement. D'une façon globale, on peut opter pour une approche intégrée à l'échelle du bassin versant et d'une façon locale, on peut agir à l'échelle de la parcelle agricole. La parcelle agricole ainsi que le microbassin agricole sont considérés comme l'échelle d'intervention immédiate de l'agriculteur à l'intérieur d'un bassin versant. C'est donc à cette échelle qu'il convient de trouver une façon plus efficace de gérer le phosphore provenant des engrais organiques (fumier, lisier) et des engrais chimiques (engrais minéraux).

Puisque la capacité du sol à relâcher le phosphore dans l'environnement dépend à la fois des processus de sorption et de désorption, plusieurs recherches ont tenté de résoudre la problématique de cet élément par le concept de degré de saturation en phosphore et de la capacité de fixation du phosphore (CFP) des sols. Ce concept a été développé en Hollande et utilisé avec succès aux États-Unis (Maguire et Sims, 2002b), au Québec (Giroux et Tran, 1996, Khiari *et al.*, 2000) et dans plusieurs autres régions (Ige *et al.*, 2005). Cependant, la quantification de ces processus reste une tâche fastidieuse, demandant beaucoup de temps de manipulation, de l'échantillonnage jusqu'aux analyses de laboratoire, ainsi que des conditions très spécifiques qui font de la CFP un concept difficile à intégrer dans les analyses de routine. C'est pourquoi des recherches ont mené à l'utilisation d'une nouvelle génération d'indices de

saturation en P pouvant être substitués au degré de saturation en phosphore. C'est le cas du Mehlich-3 qui permet de diagnostiquer l'état de fertilité des sols. Plusieurs sols agricoles présentent des teneurs excessives en P labile comparativement aux besoins des cultures. C'est pourquoi le devenir environnemental de ce P doit être évalué. Ainsi la notion de degré de saturation en P et de capacité de fixation du P par le sol est particulièrement intéressante parce qu'elle donne une mesure de la proportion des sites de sorption déjà occupés par le P tout en indiquant le potentiel de désorption de ce dernier.

Le fer et l'aluminium sont deux éléments impliqués dans la pédogenèse (Schwertmann, 1993; Duchaufour, 1977). Les sesquioxydes de fer (Fe_2O_3) et d'aluminium (Al_2O_3) sont impliqués dans la capacité de fixation du phosphore par les sols (Harrison, 1987), particulièrement au Québec où la podzolisation est un processus génétique dominant (Groupe de travail sur la classification des sols, 2002; Bernier et Carrier, 1968; Pagé et De Kimpe, 1987).

La coloration des sols semble fortement influencée par la nature et l'évolution des matériaux ferrugineux dans les sols (Simard, 1983) qui leur donnent par surcroît les teintes rouges, brunes et parfois jaunes (Joffe, 1949; Schwertmann, 1993). La couleur des sols, principale résultante de plusieurs propriétés de sols, influe sur les données satellitaires et permet non seulement au champ (sur le terrain) comme au laboratoire de définir la couleur des sols avec une grande précision, mais aussi d'aider à la cartographie des indicateurs de phosphore par le biais des sesquioxides de fer et d'aluminium.

L'agriculture de précision (AP) est un mode de gestion des terres, qui vise à cultiver de façon spécifique les sols et non les champs (Carr *et al.*, 1991). Le concept de l'agriculture de précision est basé sur la caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés de sol. L'élément P, est en soi difficile à cartographier car très variable à l'échelle de la parcelle agricole. Par contre, la capacité de fixation du P (CFP) présente souvent des structures spatiales permettant de les cartographier et les gérer en utilisant les techniques de l'agriculture de précision.

Les variables auxiliaires à la cartographie des sols telles la conductivité électrique apparente (CEA) et les paramètres extraits du modèle numérique d'altitude (MNE) sont utiles à la cartographie de la continuité spatiale des indicateurs de fertilité et de disponibilité de P.

D'autre part, les images optiques multispectrales aéroportées ou satellitaires (ASTER, IKONOS, etc.) offrent également une possibilité à la cartographie des indicateurs de fixation du

phosphore par le biais des bandes spectrales particulières correspondant à certaines régions du spectre électromagnétique comme le visible (VIS), le proche infra rouge (PIR) ou le moyen infrarouge (MIR).

En somme, la cartographie de ces indicateurs de phosphore par ces différents outils permet de gérer le phosphore soit par une approche de gestion par continuité spatiale ou par zone d'aménagement (Fridgen *et al.*, 2000), une approche qui préconise la stratification des parcelles agricoles en petites zones de sols aux propriétés pédologiques et aux comportements homogènes.

1.2 Les objectifs de la recherche

1.2.1 Objectif général

L'objectif général de la thèse est d'utiliser les variables auxiliaires à la cartographie numérique de la CFP des sols ainsi que pour délimiter les zones d'aménagement pouvant être utilisées pour la gestion spécifique du phosphore des sols.

1.2.2 Objectifs spécifiques

- 1- Développer une méthodologie novatrice de cartographie des indicateurs de la CFP à l'échelle de la parcelle agricole grâce à la télédétection.
- 2- Produire des cartes d'indicateurs de la CFP qui seront utiles à la communauté agricole et scientifique tout en facilitant une gestion précise et durable des engrais minéraux et organiques respectant l'environnement.

Pour atteindre ces objectifs, trois moyens ont été choisis :

Moyen 1 : Documenter l'intensité et la structure d'organisation de la variabilité spatiale intraparcellaire de quelques propriétés associées à la CFP des sols à l'aide des statistiques classiques univariées et de géostatistiques.

Moyen 2 : Étudier la relation spatiale entre les propriétés associées à la CFP et les variables auxiliaires (MNA, CEA, carte pédologique, images aéroportées et satellitaires).

Moyen 3 : Étudier l'efficacité des variables auxiliaires comme support à l'interpolation spatiale des indicateurs de la CFP par co-krigeage ainsi que dans la stratification des parcelles en zone d'aménagement.

1.3 Les hypothèses de la recherche

Ce projet de recherche est basé sur les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : Les propriétés associées à la CFP présentent une structure d'organisation spatiale permettant leur cartographie numérique à l'échelle de la parcelle agricole.

Hypothèse 2 : À l'échelle de la parcelle agricole, il existe une relation spatiale entre les propriétés associées à la CFP (la texture, la genèse, la taxonomie) et les variables auxiliaires (CEA, MNA, cartes de sol, images aéroportées et satellitaires).

Hypothèse 3 : L'utilisation des variables auxiliaires pour cartographier les sols permet d'améliorer la qualité et l'efficacité de la cartographie numérique des propriétés associées à CFP des sols à l'échelle de la parcelle agricole en réduisant l'erreur d'interpolation et la densité d'échantillonnage.

Hypothèse 4: L'utilisation de ces variables auxiliaires à la cartographie des sols permet de stratifier les parcelles agricoles en zone de sols présentant des propriétés associées à la CFP homogènes, statistiquement et significativement différentes les unes par rapport aux autres.

1.4 Plan de la thèse

Le présent document est constitué de sept chapitres. Le premier chapitre est une introduction présentant brièvement la problématique du phosphore dans l'environnement agricole. Le deuxième chapitre est une revue bibliographique qui décrit l'évolution du concept de la CFP, ses différentes formes ainsi que différentes approches méthodologiques utilisées pour l'aborder. Ce chapitre aborde également la présence des structures spatiales des indicateurs, les méthodes de prédiction (la variographie) nécessaire à la compréhension de l'ajustement d'un modèle théorique de semi-variogramme. Par ce fait, il énonce les concepts à la base du krigeage, du co-krigeage et des unités d'aménagement à l'aide des variables auxiliaires provenant de sources différentes (MNE, CEA, bandes spectrales extraites des images optiques multispectrale). Cette revue bibliographique cerne par la même occasion la télédétection qui devient de plus en plus

un outil important en agriculture de précision et en pédologie. Le troisième chapitre décrit l'approche méthodologique utilisée. Le site expérimental, le cadre du projet, le cadre climatique, agricole et la problématique agro-environnementale de la région seront abordés. Nous présentons également dans ce chapitre le cadre pédologique de l'étude, l'échantillonnage et les analyses de sols. Seront également décrits, les méthodes de krigeage et de co-krigeage, incluant l'ajustement du semi-variogramme et les bases de la validation croisée utilisée dans le module d'analyse géostatistique (*Geostatistical Analyst*) d'ArcGIS (ESRI, 2003). Il est aussi question de la mesure de la conductivité électrique apparente du sol et des images ayant servi de variables auxiliaires ainsi que du logiciel MZA utilisé pour la segmentation du champ en zones d'aménagement.

Au quatrième chapitre, nous décrivons la variabilité spatiale inter et intra-parcellaire des indicateurs de la CFP des sols par comparaison des variables et des champs à partir de paramètres statistiques et géostatistiques. La qualité de l'interpolation spatiale est étudiée par la même occasion. Le cinquième chapitre étudie la stratégie d'échantillonnage des sols, l'impact de la taille et de la densité d'échantillonnage sur la précision de l'estimation spatiale d'un indicateur de la CFP (AIM-3). Le sixième chapitre traite de la segmentation des parcelles en zones d'aménagement agricoles et compare l'efficacité de différentes stratégies de stratification à partir de la réduction de la variance des variables auxiliaires et des indicateurs de la CFP étudiés. Enfin, le dernier chapitre fait le point sur l'ensemble de cette étude et propose de futurs axes de recherche découlant de cette thèse.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Indicateurs de la capacité de fixation de phosphore (CFP)

Le phosphore (P) dont le nombre atomique est 15 et la masse atomique $30,97 \text{ g mol}^{-1}$ appartient au groupe V de la table périodique de Mendeleev (Mendeleev, 1877). Corbridge (1990) indique que le phosphore ne se retrouve pas à l'état libre dans la nature mais se présente dans un état entièrement oxydé sous diverses formes de phosphates. Cet élément se retrouve sous ces formes dans les sols, les roches et sédiments, dans toutes les cellules vivantes, les céréales, la nourriture, et dans beaucoup de matériaux synthétiques. Il est toutefois un élément nutritif essentiel aux plantes et doit faire l'objet d'apport régulier sous forme d'engrais et amendements en agriculture à cause de sa faible concentration dans le sol (teneur moyenne de 600 mg kg^{-1} de P total) et de sa faible solubilité, en moyenne, $0,05 \text{ mg P l}^{-1}$ dans la solution du sol (Lindsay, 1979). Le phosphore existe dans le sol sous formes inorganique (95%) et organique (5%). Les formes inorganiques sont généralement associées à des composés amorphes ou cristallins d'aluminium et de fer dans les sols acides (Harrison, 1987), tandis qu'elles sont associées à des composés de calcium dans les sols alcalins (Tran et N'dayegamiye, 1995; Al-Shankiti, 2000).

Dans le sol, on retrouve deux sortes de minéraux comportant du P. Les minéraux primaires sous forme d'apatites et les minéraux secondaires sous formes d'alumine, de fer, et de calcium. Parmi les minéraux secondaires, on distingue la variscite, encore appelée phosphate d'aluminium ou (P-Al) dont la formule chimique est $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$; la strengite ou le phosphate de fer (P-Fe) dont la formule chimique est $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$, la bruscite dont la formule chimique est $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et le phosphate octocalcite (P-octocalcite) (Bonneau et Souchier, 1979; Lyndsay, 1979).

Diverses études américaines font état d'une accumulation importante de P dans les sols des régions agricoles où l'agriculture est largement dominée par les productions animales (Sharpley *et al.*, 1994; Mozaffari et Sims, 1994; Nair *et al.*, 1995). Au Québec, une situation analogue a été rapportée dans le bassin de la rivière Beaurivage (Simard *et al.*, 1995).

Kuo *et al.* (1988) rapportent que le degré de saturation en phosphore du sol doit être défini en particulier dans la couche de surface des sols agricoles. Ainsi, diverses manières d'estimer cet indice ont été proposées par des chercheurs. Il y a environ deux décennies que le P retient une

attention particulière du monde agricole et des scientifiques du sol. Les Hollandais ont été les premiers à intégrer l'indice de saturation dans leur politique environnementale sur la gestion des lisiers et fumiers (Breeuwsma *et al.*, 1995). Dès 1995, l'indice de saturation est devenue une composante de la fertilité dans l'approche d'indexation proposée pour la gestion du P au Québec (Ministère de l'environnement et de la Faune du Québec, 1998).

La documentation des différents indicateurs de fertilité associés au P peut permettre un choix efficace d'indicateurs utile à la cartographie spatiale à l'échelle de la parcelle agricole.

2.2 Cas du $P_{ox}/(Al_{ox}+Fe_{ox})$ et du $P_{ox}/0,5(Al_{ox}+Fe_{ox})$

La capacité de fixation du P est définie comme le pouvoir d'un sol à retenir une certaine quantité de P (Giroux et Tran, 1996). Ballard et Fiskell (1974) ainsi que Yuan et Lavkulich (1994) ont rapporté que les sesquioxydes d'Al et de Fe constituent la principale source de sorption du P dans les sols acides et fournissent ainsi le meilleur indice de rétention du P.

Beauchemin et Simard (1999) rapportent qu'en Hollande, l'indice de saturation en P a été défini comme étant le ratio de la teneur en P du sol extractible à l'oxalate d'ammonium (P_{ox}) sur la capacité de sorption en P estimée soit à partir de paramètres de sorption dérivés d'expériences en laboratoire (Breeuwsma et Reijerink, 1992) ou à partir de la somme du contenu en fer et aluminium extractibles à l'oxalate, soit Fe_{ox} et Al_{ox} (Van der Zee *et al.*, 1988; Breeuwsma *et al.*, 1995). Généralement, on retrouve dans la littérature, deux variantes de l'indice de saturation en P basé sur l'extraction à l'oxalate d'ammonium, soit : $P_{ox}/(Al_{ox}+Fe_{ox})$ et $P_{ox}/0,5(Al_{ox}+Fe_{ox})$.

Dans le modèle de Van der Zee *et al.* (1987), rapporté par Beauchemin (1996), le maximum de sorption de P d'un sol saturé en P (F_m), exprimé en $mmol\ kg^{-1}$, est défini comme étant la somme de son absorption maximum dérivée de l'équation de Langmuir (X_m) et le maximum de sorption associée à un processus, plus lent, de précipitation (Van der Zee et Van Riemsdijk, 1986).

D'un autre côté, pour Freese *et al.* (1995), le paramètre F_m est dérivé d'expériences de laboratoire qui impliquent des concentrations élevées en P et des temps de réaction longs pour l'estimation de la capacité de sorption restante (Fr).

Cette étude (Freese *et al.*, 1995) rapporte que pour les sols ayant un contenu initial très faible en P, Fr fournit une bonne approximation de F_m . Cependant, en plus du Fr déterminé selon une

concentration et un temps de réaction donnés, l'évaluation de la capacité de sorption en P (F_m) doit de préférence inclure une estimation de la quantité de P sorbée quand le contenu initial en P est significatif. Schoumans *et al.* (1987), ainsi que Freese *et al.* (1992; 1995) estiment que le contenu initial du sol en P_{ox} peut-être utilisé pour comptabiliser la quantité de P déjà sorbée ($F_m = F_r + P_{ox}$).

Van der Zee *et al.* (1987) pensent que dans les sols acides, F_m peut être relié au contenu en Al_{ox} et Fe_{ox} où $F_m = \alpha_m (Al_{ox} + Fe_{ox})$, α_m étant le facteur de saturation maximum pour la sorption totale de P dans un sol non saturé en P. Par conséquent, le facteur de saturation α sera plus petit que α_m et $F = \alpha (Al_{ox} + Fe_{ox})$. De leur côté, Lexmond *et al.* (1982), cité par Van der Zee *et al.* (1987), ont montré que pour plusieurs types de sol, $P_{ox} = 0.92 F$, ce qui donne un facteur de saturation approximatif pour un sol non saturé en P de $P_{ox} / (Al_{ox} + Fe_{ox})$. Le paramètre F exprime les fractions en Fe et Al extraites avec l'oxalate, exprimées en $mmol\ kg^{-1}$. De la même façon, Van der Zee *et al.* (1988) ont rapporté que le degré de saturation d'un sol en P peut-être exprimé avec un ratio $\alpha = F/ME$ dans lequel F peut-être évalué avec P_{ox} et $ME = Al_{ox} + Fe_{ox}$ (en $mmol\ kg^{-1}$). Lookman *et al.* (1996) ont aussi fait référence aux ratios molaires de $P_{ox} / (Al_{ox} + Fe_{ox})$ comme étant un estimateur du degré initial de saturation en P des sols légèrement acides à sableux acides.

Cependant, ce dernier ratio n'exprime pas le degré de saturation de P en termes de maximum de saturation totale du P. On peut en déduire que le maximum de sorption du P total des sols acides est relié au contenu du sol en $(Al_{ox} + Fe_{ox})$.

Selon Lookman *et al.* (1995a), $\alpha_m = 0.48$ pour 17 sols agricoles de l'Allemagne. En travaillant avec deux types de podzols sableux, Van der Zee et Van Riemsdijk (1986) ont estimé leur capacité de sorption en utilisant l'indice $0,5(Al_{ox} + Fe_{ox})$, le contenu en $(Al_{ox} + Fe_{ox})$ étant exprimé en $mmol\ kg^{-1}$.

Sur la base de ces études, on peut dire que le degré de saturation de P ou la capacité de fixation de phosphore est égale à F/F_m tandis que l'indice de saturation est donné par $P_{ox} / 0,5(Al_{ox} + Fe_{ox})$.

Dans le but de comparer le degré de saturation en P des sols qui diffèrent considérablement tout en respectant leur capacité de sorption de P total, Freese *et al.* (1995) ont utilisé l'indice F/F_m comme étant « la fraction de saturation de la capacité totale de sorption de P ». Dans cette étude

réalisée par Freese *et al.* (1995), F_m était expérimentalement déterminé pour chaque sol et $P_{ox}/0,5(Al_{ox}+Fe_{ox})$ a été utilisé comme indice de saturation comparatif pour tous les types de sol considérés qu'ils avaient un $F_m = 0,5(Al_{ox}+Fe_{ox})$ semblables. Il convient de rappeler ici que ceci ne sera pas toujours le cas pour tous les sols et pour toutes les études. Mais soulignons que 0,5 reste un facteur empirique qui a été obtenu à partir d'un ensemble de sols dans des conditions expérimentales données. Ainsi, Freese *et al.* (1995) ont effectué leur étude sur des sols acides sableux dont le pourcentage en argile varie entre 2 et 22 %, et que l'expérience de sorption a été réalisée avec un temps de réaction de 40 jours à des concentrations élevées de P ($c= 5 \text{ M MKH}_2\text{PO}_4$).

Pour une longue réaction de 249 jours avec une concentration de P de 5 mM, Van der Zee *et al.* (1988) ont trouvé $\alpha= 0,61$ pour 84 échantillons de sol de surface et $\alpha= 0,34$ pour les échantillons de la couche sous-jacente ($c= 0,5 \text{ mM}$).

2.3 Cas du P_{M-3}/X_m et du P_{M-3}/Al_{M-3}

Beauchemin et Simard. (1999) rapportent que dans plusieurs pays, le P extractible à l'oxalate n'est pas déterminé par des analyses de routine au laboratoire et qu'ainsi, il est important de définir un indice de saturation précis et facilement mesurable. C'est ainsi que Sharpley (1995), aux USA, a utilisé le rapport du P extractible au Mehlich-3 sur X_m (X_m étant le maximum de sorption dérivé de l'isotherme de Langmuir exprimé en mg kg^{-1}) et que Giroux et Tran (1996), au Québec (Canada), l'ont utilisé comme indicateur agro-environnemental pour assurer une gestion durable du P. Toutefois, Sharpley (1995) a noté que la détermination de cet indice peut être restreinte par la nécessité d'évaluer X_m , car celui-ci exige beaucoup de manipulations au laboratoire lors des expériences de sorption. Pour surmonter cette limitation, Giroux et Tran (1996) ont proposé d'utiliser le ratio du P extractible au Mehlich-3 sur l'aluminium extractible au Mehlich-3 (P_{M-3}/Al_{M-3}) pour les sols agricoles du Québec. Le contenu du sol en aluminium extrait en Mehlich-3 (M-3) est alors positivement et linéairement corrélé au contenu en oxydes d'aluminium (Al_{ox}) lorsque celui-ci est inférieur à 6 g kg^{-1} ($Al_{ox} < 6 \text{ g kg}^{-1}$).

2.4 Quelques travaux sur les indices de P

Bien avant que Tabi *et al.* (1990), lors d'un inventaire de la qualité des sols agricoles du Québec, observent une accumulation de P dans l'horizon de surface des sols sous monoculture de maïs grain ou de plantes horticoles, Laverdière *et al.* (1981) ont trouvé une corrélation très élevée entre les caractéristiques des sols et quelques paramètres de sorption pour 13 échantillons de sol de surface. Par exemple, citons $Fe_{ox}+Al_{ox}$ ($r=0,93$) et Al_{ox} ($r=0,97$) pour neuf sols podzoliques provenant des basses-terres du Québec méridional. Selon l'étude réalisée par ces auteurs, les paramètres de sorption de P des gleysols étaient fortement corrélés aux ratios $Al_{ox}/argile$ (%), $Fe_{ox}/argile$ (%) et $Al_{pyro}/argile$ (%). Ils estiment que ces ratios expliquent davantage la variation de la sorption du P que les différentes propriétés de sol.

Laverdière et Karam (1984) ont évalué la capacité de sorption du P de quelques échantillons de podzols et de gleysols pour identifier d'une part la réaction produite par le P du sol par l'usage de diagramme de solubilité et d'autre part pour déterminer le rapport existant entre les diverses propriétés de sol et divers paramètres de sorption comme le maximum de sorption, le maximum de capacité tampon ainsi que l'indice de sorption de P par simple analyse de régression. Les résultats de leur étude montrent que parmi toutes les propriétés pédologiques étudiées, $Fe_{ox}+Al_{ox}$ était significativement corrélé à la plupart des paramètres de sorption du P pour les horizons provenant des sols podzoliques montrant ainsi que $Fe_{ox}+Al_{ox}$ était le meilleur indicateur de la sorption du P.

Douze ans après les conclusions des études de Laverdière et Karam (1984), Giroux *et al.* (1997) ont poursuivi leur réflexion en étudiant le niveau de saturation en P de 100 échantillons de surface (horizon Ap) de la région des Basses-Terres du St-Laurent au Québec, Canada. Les résultats de cette étude ont montré que les indices (P_{M-3}/Al_{M-3}) , (P_{M-3}/X_m) , et $P_{ox}/(Al_{ox}+Fe_{ox})$ étaient tous étroitement corrélés. Ils ont également trouvé que (P_{M-3}/Al_{M-3}) était significativement corrélé au ratio $P_{ox}/(Al_{ox}+Fe_{ox})$ et). Ces indices de saturation sont ceux de 27 échantillons de sol provenant de l'horizon A de séries de sols appartenant aux gleysols et dont le pH varie de neutre à légèrement alcalin. Ils ont conclu qu'étant donné que l'indice de saturation en P vise aussi à évaluer le risque de lixiviation du P (processus au cours duquel l'eau de ruissellement et d'infiltration contenant le phosphore mobile passe au travers des horizons

situés en dessous de la surface du sol), leur signification dans les horizons inférieurs devrait être aussi considérée.

Quelques années plus tard, Vézina *et al.* (2000) ont étudié 182 séries de sols appartenant aux gleysols, brunisols et régosols, à partir d'échantillons prélevés lors de l'inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles conduit par Tabi *et al.* (1990). Ces auteurs ont proposé un regroupement des sols du Québec (Canada) selon leur capacité de fixation du P en relation avec leurs caractéristiques pédologiques. Les résultats de cette étude montrent que d'une part, un premier regroupement pourrait résulter de l'influence des processus pédogénétiques (par exemple, podzolisation, gleyfication et brunification) sur la capacité de fixation en P des sols. D'autre part, ils ont montré que la texture est un critère déterminant sur la capacité chimique et physique des sols à retenir le P. Ainsi, les gleysols de texture fine ou moyenne, présentent une capacité plus grande à fixer le P que ceux de texture plus grossière. En outre, les podzols très poreux et de texture grossière favorisent un lessivage rapide d'une partie du P des fertilisants appliqués malgré leur bonne capacité de fixation.

À la même période, et dans le même ordre d'idée de former des groupes homogènes de sols afin de tenir compte de leurs propriétés particulières et de leur comportement distinct, Leclerc *et al.* (2001) ont proposé un groupement des sols de la région de Montréal (Québec) selon différents indicateurs de la fertilité et de la capacité de fixation et de désorption du P. Soixante-six types de sols ont été sélectionnés pour représenter la région choisie. Parmi les indicateurs de sols étudiés, il y avait P_{M-3} , Al_{M-3} , P_{ox} , Fe_{ox} et Al_{ox} , la capacité de sorption en P (P_{si}) et le P extrait par la méthode Bray-2 (PBR2). Les résultats de cette étude montrent que la classe texturale est le principal facteur qui influence la capacité de sorption du P dans l'horizon Ap. Le second facteur étant le processus pédogénétique dominant du sol. Ces constatations expliquent la raison pour laquelle les gleysols argileux possèdent une capacité de sorption de P plus élevée que les gleysols sableux et que les podzols sableux présentent une capacité de sorption du P plus élevée que les brunisols et les gleysols développés sur matériaux sableux. Selon leurs recherches, les sols ayant une faible capacité de sorption de P et un pH proche de la neutralité présentent un indice de désorption du P tel qu'estimé par une teneur en P soluble à l'eau (P_w) plus élevée.

Leclerc *et al.* (2001) ont proposé des équations de prédiction de l'indice de sorption de P (P_{si}) à partir de la base des données pédologiques de la plaine de Montréal, soit le contenu en argile, la

CEC, le pH, la teneur en magnésium extrait à l'acétate d'ammonium et en phosphore extrait par la méthode Bray-2 de la couche de surface des sols agricoles. L'objectif de cette étude était d'interpréter les informations pédologiques disponibles dans cette région en termes de vulnérabilité potentielle des sols agricoles à la contamination de l'eau par le P.

De même, Khiari *et al.* (2000) ont étudié l'indice de saturation du P de sols acides à texture grossière dans le but de développer un modèle agro-environnemental de recommandation de la fertilisation en P qui intègre le risque environnemental du P ainsi que la réponse des plantes au P. Pour cela, ils ont utilisé P_{M-3} et Al_{M-3} exprimés en $mg\ kg^{-1}$ et le ratio (P_{M-3}/Al_{M-3}) exprimé en pourcentage. Les résultats de cette étude montrent que, suite au regroupement des sols selon leur fertilité, les paramètres de réponse des plantes et les concepts de saturation peuvent être tous combinés pour faire une recommandation de fertilité en P pour la pomme de terre. Par ailleurs, Khiari *et al.* (2000) ont comparé le test de fertilité P_{M-3} avec le ratio P_{M-3}/Al_{M-3} et ont trouvé que les deux méthodes donnent des résultats comparables et bien ajustés à la réponse de la plante ainsi qu'au taux de dissolution du P dans les sols enrichis par cet élément. Le seuil critique de P_{M-3}/Al_{M-3} était de 8% (valeur de réponse critique) alors que le seuil environnemental était de 15%. Pour ces chercheurs, ces deux valeurs définissent les limites à considérer pour définir des groupes de fertilité et de réponse des sols pour la gestion des intrants à base de P. Ils en concluent que le ratio P_{M-3}/Al_{M-3} offre un critère fiable pour la recommandation de fertilisation en P tant sur le plan agronomique qu'environnemental assurant ainsi une production durable de la pomme de terre.

Au cours d'une étude portant sur les indices environnementaux de saturation en P des sols minéraux acides à neutres du Québec de différentes textures et genèses, Pellerin *et al.* (2006) ont proposé de définir des valeurs critiques de P_{M-3}/Al_{M-3} en lien avec le P_w , un indice de désorption de P et de contamination des eaux de surface. Ainsi, 275 échantillons de la couche de surface et 175 échantillons de la couche sous-jacente ont servi à mener cette étude. Les résultats ont montré que, contrairement à l'indice P_w proposé par Sissingh (1971), la méthode d'analyse de routine Mehlich-3, largement utilisée en Amérique du Nord, est souvent affectée par la texture du sol. Selon Pellerin *et al.* (2006), comme le P_w n'est pas ou peu influencé par la texture du sol, il peut être utilisé pour établir un seuil commun pour les sols. L'étude de Pellerin *et al.* (2006) permet également d'expliquer l'effet de la texture du sol sur le ratio P_{M-3}/Al_{M-3} (c'est à dire que pour un même rapport P_{M-3}/Al_{M-3} , les sols de texture fine $> 300\ g$ d'argile kg^{-1}

et gléifiés tendaient à libérer plus de P_w que les sols à texture grossière ($< 300 \text{ g d'argile kg}^{-1}$) et podzolisés. Selon ces auteurs, le ratio P_{M-3}/Al_{M-3} serait un indice environnemental fiable d'accumulation de P et de risque de lixiviation dans les sols minéraux acides et neutres podzoliques ou gleysoliques lorsque l'on tient compte de la texture du sol.

Par ailleurs, les résultats de Pellerin *et al.* (2006) ont montré que, lorsque le niveau de P_w est établi à $9,7 \text{ mg L}^{-1}$, le rapport critique (seuil environnemental) de P_{M-3}/Al_{M-3} se situe entre 5,8 à 15,3 % dépendamment du contenu en argile. Cette équipe de chercheurs a ainsi proposé un regroupement des sols en deux catégories basé sur la teneur en argile du sol : (1) teneur en argile inférieure ou égale à 300 g kg^{-1} et (2) teneur en argile supérieure à 300 g kg^{-1} . Pour ces deux groupes, un ratio critique de P_{M-3}/Al_{M-3} a été proposé, soit respectivement 13,1 et 7,6 %.

À partir de 115 échantillons de sol de surface, Ige *et al.* (2005) ont étudié la capacité de rétention de P des sols du Manitoba et ont proposé des équations reliant cette capacité à d'autres propriétés du sol comme le Psi. Ces données leur ont également permis de créer un indice de sorption du P à un point. Les résultats de cette étude ont révélé que les meilleures relations entre les paramètres d'adsorption et les propriétés du sol viennent de la somme du Ca et du Mg extractibles par la méthode Mehlich-3 ($Ca_{M-3}+Mg_{M-3}$). En effet, selon ces chercheurs, la somme de ces deux éléments (Ca+Mg) explique ensemble 56 % de la variation du P dans les sols du Manitoba tandis qu'au Québec, c'est la teneur en argile et en aluminium qui influencent le P dans les sols acides.

Plusieurs indicateurs de fertilité associés à la gestion du P dans les sols ont été développés et proposés ces dernières années pour assurer la durabilité tant agronomique qu'environnementale des systèmes agricoles. Plusieurs chercheurs du Québec ont participé à ce développement technologique. Cependant, l'utilisation de ces indicateurs à l'échelle de la parcelle agricole requiert la caractérisation de la variabilité spatiale de ces différents indicateurs ainsi que des propriétés pédologiques qui leur sont associées. La prochaine section fera le point sur les travaux réalisés sur la spatialisation de ces différentes propriétés de sol.

2.5 Variabilité spatiale et cartographie des indicateurs de la CFP

Au cours des dernières années, l'étude de la variabilité spatiale des paramètres de fertilité a pris beaucoup d'ampleur. Cependant, les recherches ayant porté sur la distribution spatiale de P

dans les sols agricoles se sont concentrées seulement sur les indicateurs de sa disponibilité à la plante et non à la cartographie des indices de capacité de fixation du P pour les sols en rapport au fer, à l'aluminium, au calcium ou au magnésium. Les nombreux résultats de ces différentes recherches montrent que la distribution spatiale du P disponible n'est pas toujours aléatoire mais que parfois, cet élément montre des modèles de distribution spatiale avec des portées bien définies selon les méthodes d'échantillonnage et de recherche (Gassner et Schnug, 2003) ajouter des références pour appuyer cette affirmation). Le tableau 1 montre que dans la plupart des méthodes d'échantillonnage par grille, les chercheurs utilisent des modèles de variogrammes sphérique ou exponentiel et que les intervalles d'autocorrélation varient selon la méthode d'échantillonnage. Nous nous référons à (Gassners, 2003) pour les différents auteurs cités dans ce tableau.

Tableau 1 : Valeur de portée mesurée pour le P dans différentes études (adapté de Gassner et Schnug, 2003).

Références	Méthode d'échantillonnage	Méthode d'extraction	Modèle du variogramme	Portée (m)
Trangmar, 1982	grille 1,5 X 1,5 m	Truog	Sphérique	5,6
Boyer <i>et al.</i> , 1996	transects 2 m	Bray I	Sphérique	37
Doberman <i>et al.</i> , 1997	grille triangulaire 5 m	Olsen	Niché	48
Simard <i>et al.</i> , 2000	grille triangulaire 12 x 15 m	Mehlich III	Exponentiel	139
Karlen <i>et al.</i> , 1997	grille 15 x 15 m	Bray I	Sphérique	70
Webster et McBratney, 1987	grille aléatoire 16 X 16 m	Morgan	Sphérique	241
Gupta <i>et al.</i> , 1997	grille 20 X 20 m	Mehlich I	Exponentiel	29
Romanokov, 1997	grille 20 X 20 m	0,2N HCL	Sphérique	50-60
Nolin <i>et al.</i> , 1996	grille 30 X 30 m	Mehlich III	Exponentiel	39
Haneklaus <i>et al.</i> , 1997	grille 30 X 30 m	CAL	Sphérique	153
Haneklaus <i>et al.</i> , 1997	grille 30 X 30 m	AAC-EDTA	Sphérique	110
Haneklaus <i>et al.</i> , 1997	grille 50 X 50 m	DL	Sphérique	115
Haneklaus <i>et al.</i> , 1997	grille 50 X 50 m	DL	Sphérique	131
Haneklaus <i>et al.</i> , 1997	grille 50 X 50 m	CAL	Sphérique	253
Chien <i>et al.</i> , 1997	grille 250 X 250 m	Mehlich III	Sphérique	580
Yost <i>et al.</i> , 1982	transects 1-2 km	Olsen	Exponentiel	1000

2.6 Méthodes de prédiction spatiale ou variographie

La géostatistique est un outil d'analyse de la structure de variation et d'organisation spatiale de l'information géographique, comme les propriétés des sols (fertilité, texture...). Elle regroupe un ensemble de techniques statistiques permettant aux pédologues et aux scientifiques du sol de mieux comprendre et de reproduire le modèle de la variabilité spatiale des sols (Trangmar *et al.*, 1985). Ces techniques reposent sur l'analyse numérique de la dépendance des échantillons dans l'espace. En d'autres termes, cela signifie que « plus les échantillons sont rapprochés dans l'espace, plus ils se ressemblent jusqu'à une certaine distance au-delà de laquelle ils deviennent indépendants les uns des autres » (Nolin, 2000). Une méthode couramment utilisée pour étudier la dépendance spatiale des observations est d'analyser le semi-variogramme, un graphique qui présente la variation de la demi-variance $\gamma(h)$ en fonction de la distance (h) entre les échantillons.

2.6.1 Le semi-variogramme

Le semi-variogramme, fonction qui exprime la variation de la demi-variance est couramment utilisé pour analyser la dépendance des observations spatiales (Nolin *et al.*, 1997). Elle est à la base de la technique d'interpolation par krigeage. Le semi-variogramme permet de déterminer si la distribution des paramètres étudiés est régionalisée (i.e. possède une structure spatiale), aléatoire ou périodique. La figure 1 présente un modèle théorique de semi-variogramme où la semi-variance $\gamma(h)$ est fonction de l'intervalle d'échantillonnage (h) et dont l'équation est donnée par :

$$\gamma(h) = 1/2 \text{ var } (Z(x) - Z(x+h)) \quad (1)$$

Pour faire l'analyse spatiale d'une propriété, trois paramètres sont importants à considérer dans ce graphique. Ce sont la constante de pépité, le palier et la portée (Smith, 1993). La constante de pépité (*nugget*) est la valeur de $\gamma(h)$ quand $h=0$. Elle représente la composante aléatoire de la variation et correspond à l'erreur d'échantillonnage et à la variabilité présente à une distance inférieure à l'intervalle d'échantillonnage (*lag*), donc non prise en considération par le dispositif d'échantillonnage. Le palier, si présent, est caractérisé par l'atteinte d'un plateau où $\gamma(h)$ devient constant avec l'évolution de h . Si les échantillons sont reliés les uns aux autres, le semi-variogramme prend une allure linéaire dans sa phase initiale pour ensuite atteindre le palier

(Nolin *et al.*, 1997). La valeur de h pour laquelle $\gamma(h)$ atteint le palier s'appelle la portée. Celle-ci s'avère très utile pour fixer l'intervalle optimal d'échantillonnage puisque les échantillons prélevés à une distance inférieure à la portée sont spatialement dépendants (Nolin *et al.*, 1997). Le rapport $C_0/(C_0+C)$ où C (variance structurale) représente la composante systématique de la variabilité, s'avère également un indice intéressant pour analyser la structure spatiale d'une propriété ainsi que la stratégie d'échantillonnage utilisée. Plus la composante systématique est élevée relativement à la composante aléatoire (rapport $C_0/(C_0+C)$ faible), plus la structure d'organisation spatiale de la propriété est développée, élément essentiel pour obtenir des interpolations spatiales fiables. Par contre, lorsque la composante aléatoire (C_0) est relativement élevée par rapport à la composante systématique (rapport $C_0/(C_0+C)$ élevé), il convient d'utiliser un intervalle d'échantillonnage plus rapproché afin de mieux intégrer la microvariabilité ou d'améliorer la méthode de mesure afin de diminuer l'erreur expérimentale (Nolin *et al.*, 1997).

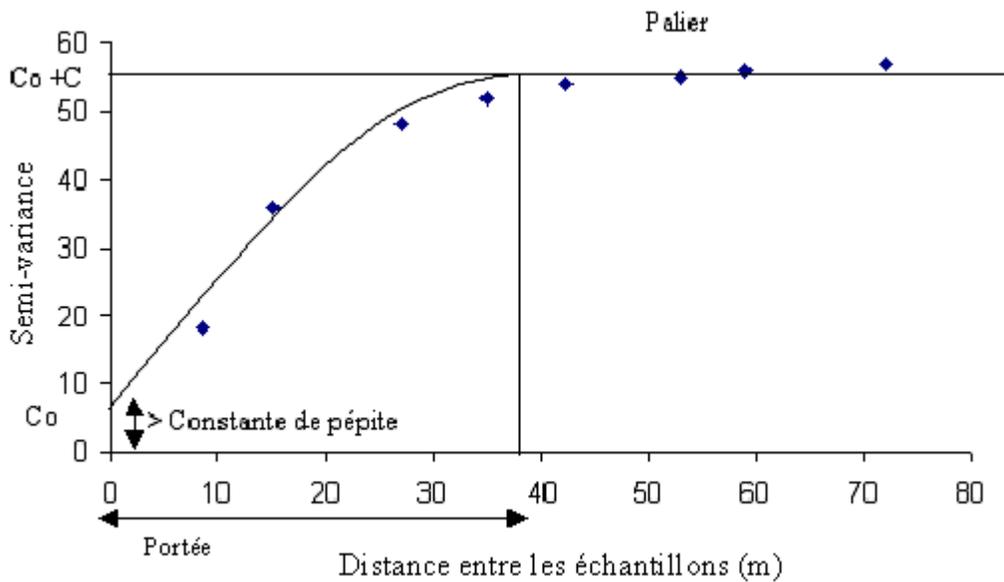


Figure 1 : Semi-variogramme théorique (modèle sphérique).
(Source : Provencher, 2003)

Pour un usage efficace, il faut que les valeurs expérimentales soient ajustées à un modèle théorique de semi-variogramme. Les modèles à palier de type linéaire, sphérique et exponentiel ont été les plus couramment utilisés en pédologie (Webster, 1985; McBratney et Webster, 1986).

2.6.2 Le coefficient de variation

Le coefficient de variation (CV) est le paramètre le plus couramment utilisé dans la littérature pour décrire et comparer la variabilité des différents descripteurs pédologiques de type métriques (Wilding et Drees, 1983). Cinq classes, basées sur la valeur du CV, sont proposées par Nolin *et al.* (1997) pour qualifier l'intensité de la variabilité des sols (Tableau 3).

Tableau 2 : Classes d'intensité de la variabilité (Source : Nolin *et al.*, 1997).

Intensité de la variabilité	Coefficient de variabilité (%)
Faible	<15
Modérée	15-35
Élevée	35-50
Très élevée	50-100
Extrêmement élevée	>100

Des valeurs de CV de quelques descripteurs pédologiques publiés dans 27 articles scientifiques ont été compilées par Nolin et Caillier (1992b). Ces données font ressortir l'importance du type de descripteurs (morphologiques, chimiques, physiques, etc.), la nature de l'horizon (profondeur et évolution génétique) et du matériau originel (granulométrie et mode de déposition) sur la variabilité des propriétés pédologiques. Ces données doivent être utilisées uniquement comme élément d'analyse comparative en gardant à l'esprit qu'en pédologie, chaque région, chaque sol et chaque parcelle revêt un caractère spécifique (Nolin *et al.*, 1997).

2.6.3 Krigeage

La présence de structures spatiales, où les observations qui sont proches les unes des autres sont plus semblables que celles distantes les unes des autres (autocorrelation spatiale), est une condition préalable à l'application de la géostatistique (Goovaerts, 1999). **Un semi-variogramme expérimental mesure la moyenne du degré de dissemblance entre une valeur non échantillonnée et une valeur échantillonnée de proche** (Deutsch et Journel, 1998) et donc peut représenter l'autocorrélation pour plusieurs distances. La valeur du semi-variogramme expérimental pour une distance de séparation h (communément appelé *lag* dans les logiciels de géostatistique) est la moitié de la différence entre la valeur à $Z(x)$ et la valeur à $Z(x+h)$ (Lark, 2000b).

L'échantillonnage fournit des informations exactes sur le sol aux points d'où proviennent les données. Cependant, ceci ne dit pas ce qui se passe entre ces points. Il faut donc une méthode précise pour estimer les valeurs aux points intermédiaires ou les moyennes sur un ensemble. Le krigeage est une méthode d'estimation qui tient compte d'un certain nombre de facteurs. Elle doit son nom au Professeur Krige, un ingénieur des mines sud-africain, qui a développé une technique simple de régression permettant d'estimer les teneurs en éléments du sol (particulièrement l'or) sans biais. Cette méthode a été améliorée par le professeur Matheron qui lui a donné la dénomination de krigeage (Matheron, 1967). Le krigeage est fondamentalement une estimation linéaire (au sens de la moindre variance). Il fournit la moyenne pondérée des valeurs des échantillons qui conduit à l'erreur d'estimation de la variance minimale (Armstrong et Carignan, 1997). En d'autres termes, le krigeage associe une erreur d'estimation à chacune des cellules pour évaluer la précision et la fiabilité de la prédiction. La précision des estimations dépend d'un certain nombre de facteurs, soit :

- ✓ Le nombre d'échantillons et la qualité des données en chaque point;
- ✓ La position des échantillons sur le site étudié, car les échantillons régulièrement espacés offrent une meilleure couverture et donnent ainsi davantage d'informations sur le site que des échantillons regroupés;
- ✓ La distance entre les échantillons et le point dont on veut estimer la valeur;

- ✓ La continuité spatiale de la variable étudiée : il est plus facile d'estimer la valeur d'une variable assez régulière que celle d'une variable qui varie de façon aléatoire.

Plusieurs études ont démontré l'efficacité des méthodes du krigeage pour l'interpolation des descripteurs pédologiques ou pour la cartographie de la variabilité du phosphore dans les sols (Myers, 1994; Sullivan *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2006; Rivero *et al.*, 2007).

2.6.4 Le co-krigeage

Il arrive souvent que l'on doive étudier la distribution spatiale d'une variable principale mais qu'on ait des informations sur une ou plusieurs variables secondaires qui sont corrélées spatialement avec la variable primaire. On fait donc appel à un outil appelé co-krigeage. Le co-krigeage (Chilès et Delfiner, 1999) est un outil mathématique d'interpolation et d'extrapolation qui utilise la corrélation spatiale entre une variable secondaire (ici, la CEA, le MNT, les données d'image satellitaires) et une variable principale (la CFP ou autres propriétés de sol) afin d'estimer la variable principale à des endroits non échantillonnés. Le co-krigeage alloue des poids aux données qui minimisent la variance d'estimation. L'intérêt principal du co-krigeage réside dans le fait que l'utilisation de l'information d'une variable secondaire corrélée spatialement avec la variable primaire peut aider à réduire la variance de l'erreur d'estimation. Le co-krigeage est surtout utilisé lorsqu'il y a peu d'échantillons de la variable primaire. L'estimation par co-krigeage à un point p est faite pour une combinaison linéaire de la variable V avec une, deux ou n variables secondaires S pour lesquelles on a des mesures.

2.6.5 Limites de la variographie et naissance du concept de zones d'aménagement

Lorsqu'il est impossible de prédire avec précision et fiabilité la variation spatiale d'une propriété utilisée pour les recommandations, à moins d'utiliser une densité d'échantillonnage trop élevée pour être rentable, il convient de trouver une alternative entre cette approche et l'application uniformation d'intrants (approche traditionnelle). La gestion des intrants par zone d'aménagement offre cette alternative (Doerge, 2000).

Qu'il soit réalisé avec ou sans grille d'alignement, l'échantillonnage systématique des sols ne tient pas compte de la nature et de la distribution des sols, informations présentées sur les cartes pédologiques et souvent connues des agriculteurs eux-mêmes (Doerge, 2000; Dalsted *et al.*, 2000; Clay *et al.* 2000; Snyder *et al.* 2000). Ainsi, la qualité d'une technique d'interpolation

dépend souvent de la méthode et de la densité d'échantillonnages utilisés. Par ailleurs, le fondement de cette approche de gestion par zone d'aménagement repose sur une bonne connaissance de la variation des propriétés de sols dans le paysage. Par exemple, dans les plaines de la Pennsylvanie (É-U) des producteurs agricoles ont trouvé que les résultats d'analyse traditionnelle de laboratoire des échantillons provenant d'un transect de 390 m ont varié de 56% par rapport aux résultats d'analyse d'échantillons par grille d'alignement et géoréférencés le tout appuyé par une interpolation par krigeage. Ce constat encourage de plus en plus d'agronomes et de producteurs agricoles adoptent le concept de gestion par zone d'aménagement, définie comme une sous-région d'un champ ayant des caractéristiques pédologiques ou de fertilité homogènes et pour laquelle un seul taux d'application de fertilisant serait approprié pour une culture donnée (Doerge, 2000).

2.7 Les zones d'aménagement

Le sol est un milieu très complexe où la variation spatiale et temporelle de ses propriétés est contrôlée par un ensemble de facteurs qui agissent parfois indépendamment, parfois conjointement, mais aussi à différentes échelles ou niveau de perception (Burrough, 1983a). Il existe plusieurs dimensions de la variabilité des sols (Nolin et Caillier, 1992a) et les facteurs tant pédologiques qu'anthropiques qui sont à l'origine de ces variations à l'intérieur d'une parcelle agricole influencent les rendements des cultures (Corwin *et al.*, 2003).

Le principe de gestion des cultures spécifique à un site (GCSS) qui découle de l'agriculture de précision est un concept basé sur la présence de structure d'organisation spatiale des sols et des cultures en termes de rendement et de qualité à l'intérieur d'un même champ (Cambouris *et al.*, 2006). Pour réduire la variabilité des propriétés de sol à l'intérieur du champ, la GCSS préconise la stratification des parcelles agricoles en petites zones de sols aux propriétés et comportement homogènes appelées zones d'aménagement (ZA) (Fridgen *et al.*, 2000). Ces zones peuvent être utilisées pour améliorer les décisions sur la gestion des sols et des cultures (Mulla, 1989). La délimitation de ZA n'est pas toujours une tâche facile en raison de la combinaison complexe de facteurs édaphiques, anthropiques, biologiques et météorologiques qui affectent les parcelles agricoles, les cultures et leurs rendements (Corwins *et al.*, 2003). Cependant, une délimitation efficace des ZA peut améliorer l'échantillonnage des sols ainsi que

la gestion des éléments nutritifs (Cambouris *et al.* 2006), en particulier le phosphore et sa capacité de fixation.

Dans les nombreuses approches qui existent pour délimiter les ZA, la télédétection en est une en plein développement et dont les résultats sont très prometteurs dans un futur rapproché pour guider efficacement des interventions de GCSS (Brisco *et al.*, 1998). On peut citer aussi l'utilisation des cartes détaillées (> 1 : 10 000) de sol, les cartes de rendement et d'échantillonnage intensif des sols. Une autre approche consiste en l'utilisation de la mesure de la conductivité électrique apparente (CEA) des sols, une donnée relativement stable dans le temps et dont l'acquisition à une haute densité de mesure est rapide et précise, s'avère une des meilleures technologies modernes pour délimiter des ZA intra champ (Cambouris *et al.*, 2006). Les ZA intra champ présentent généralement des propriétés relativement homogènes en termes de dynamique des éléments nutritifs qui incorporent la variabilité spatiale des sols (Van Alphen et Stoorvogel, 2000).

2.8 Zones d'aménagement et propriétés des sols

Certaines propriétés des sols comme la topographie, la conductivité électrique, la couleur du sol sont significatives dans un concept de ZA. Lorsqu'elles sont reliées au rendement des cultures, elles deviennent fiables et peuvent être prises en compte pour définir les ZA (Doerge, 2000). L'avantage de ces données est qu'elles sont stables dans le temps et n'ont besoin d'être mesurées qu'une seule fois (Doerge, 2000). C'est aussi le cas des propriétés indicatrices de la capacité de fixation du P par les sols (AlM-3, AlM-3+FeM-3, Alox+ Feox) qui sont stables dans le temps car certaines propriétés de sols liées au processus pédogénétiques (podzolisation, gleyification, brunification, oxydo-réduction) et dont la nature et l'intensité dépendent en grande partie de la position du sol dans le paysage (pédo-paysage) peuvent être stables dans le temps ou varier sommairement en raison des facteurs anthropiques (travail du sol, pratiques culturales). Des études ont été menées par Ortega et Santibanez (2007) pour déterminer les zones d'aménagement dans la production de maïs (*Zea mays L.*) basée sur la fertilité du sol. Les résultats ont montré que, pour délimiter de façon efficace les ZA, il est plus important de bien déterminer les propriétés de sols qui sont responsables de la variation observée dans les parcelles que de choisir la méthode la plus puissante de segmentation ou de zonage.

2.9 Zones d'aménagement délimitées à partir de variables auxiliaires

Parmi les nombreuses approches utilisées pour délimiter les ZA, l'usage des cartes de conductivité électrique peut guider une gestion spécifique d'éléments nutritifs à un site donné dans le cas de plusieurs cultures. Ainsi, Lund *et al.* (2001) ont étudié les rendements des cultures de blé et de coton, et ont trouvé que les cartes de conductivité électrique apparente ont aidé à la délimitation des ZA intra champs. La gestion de ces ZA a permis une augmentation du rendement de blé de 11, 3 % et une diminution de 30 % de la fertilisation en azote en comparaison avec une application traditionnelle uniforme dans le cas de la culture du coton.

Selon Corwin et Lesch (2003), la conductivité électrique apparente est une des données spatiales du sol facile à mesurer et qui est utile comme stratificateur pour guider la gestion des sols et des cultures spécifiques. Williams et Hoey (1987) soulignent que la CEA des sols est corrélée avec la texture du sol. Elle l'est aussi avec les attributs de terrain topographie (Fridgen *et al.*, 2000), avec la matière organique du sol (Banton *et al.*, 1997), avec la teneur en argile et en eau (Doolittle *et al.*, 1994; Kitchen *et al.*, 2005). La topographie n'est pas une propriété de sol mais plutôt un attribut du terrain. Elle peut être utilisée comme variable auxiliaire pour délimiter les ZA. Dans ce cas, l'on parle de modèle numérique d'élévation (MNE). La prospection électrique des sols est plus efficace et moins coûteuse qu'une étude pédologique très détaillée ou que l'échantillonnage intensif de sols à l'aide d'une grille. L'utilisation des senseurs de la CEA pour délimiter les ZA à l'intérieur d'une parcelle agricole est récente mais prometteuse (Cambouris, 2007). Cet auteur souligne que la CEA des sols peut être rapidement cartographiée en utilisant un appareil commercial comme le Geonics EM-38 (Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada) ou le VERIS 3100 (Veris Technologies, Inc. Salina, KS) en combinaison avec un système de positionnement par satellite en mode différentiel. D'une façon générale, les cartes pédologiques (à un niveau de prospection < 2), les MNA, les images satellitaires et la conductivité électrique apparente (CEA) servent aussi à délimiter des ZA. (Doerge, 2000; Dalsted *et al.*, 2000). Cette nouvelle façon d'acquérir des données résulterait de la problématique d'échantillonnage par rapport à son coût et l'alternative qu'offre les variables auxiliaires (variables densément mesurées) pour stratifier les parcelles. Lorsqu'on utilise des images satellites comme variables auxiliaires, il faut tenir compte du type de satellite, la résolution au sol, le type de bande spectrale, la dimension de l'image, le coût

approximatif d'acquisition, la résolution spectrale, la rotation et la révolution du satellite (Dalsted *et al.*, 2000).

2.10 Problématique du coût d'échantillonnage et les variables auxiliaires

Historiquement, la compréhension qu'ont les scientifiques du sol, l'évaluation de sa qualité et de son fonctionnement est obtenue à partir des analyses classiques de laboratoire. Par exemple, la plupart des méthodes d'analyse de sol utilisées aux États-Unis ont été développées dans les années 1940 (Jones, 1999). La méthodologie de chaque analyse a été discutée, modifiée pour ensuite faire l'objet d'une description officielle (Carter, 1993). Malgré tout, certaines propriétés des sols et les méthodes d'analyses qui leur sont associées continuent de susciter des controverses (Novaes et Smith, 1999). La plupart des plans de fertilisation agro-environnementaux exigent des analyses de sol périodiques pour permettre une meilleure gestion des sols et de la qualité des eaux (exemple du PAEF au Québec). Il faut souligner que ces analyses demandent beaucoup de temps et nécessitent une quantité de sol importante. C'est pourquoi les méthodes rapides comme la télédétection et les variables auxiliaires pour estimer les propriétés des sols et évaluer quantitativement les problèmes de gestion des sols agricoles et les terres sont nécessaires.

Avec l'avènement de l'agriculture de précision débutée dans les années 1980, laquelle exige une évaluation rapide, fréquente et intensive des propriétés des sols (Searcy *et al.*, 1989), la gestion spécifique des sols et des cultures a entraîné une demande croissante de méthodes d'analyse de sol rapides et moins coûteuses (Bouma *et al.*, 1999). Selon les normes établies, en agriculture de précision, les recommandations exigent un seul échantillon de la couche de surface du sol par hectare (Wolkowski et Wollenhaupt, 1994). Les coûts d'échantillonnage et d'analyse des sols en agriculture de précision sont très élevés à cause du nombre élevé d'échantillons prélevés par rapport aux coûts des méthodes traditionnelles (Demattê *et al.*, 2001). Au Québec, par exemple, le coût standard d'analyse d'un échantillon de sol est approximativement de 35 \$ Can. Ceci a pour effet de freiner l'implantation de la gestion spécifique des sols et des cultures. Par conséquent, des alternatives plus abordables sont nécessaires comme l'utilisation des nouvelles technologies pour estimer les propriétés de sols.

Toutes ces raisons ont poussé les chercheurs de partout dans le monde à examiner les nouvelles technologies comme une alternative possible par rapport aux méthodes d'analyse de laboratoire traditionnelle. Batten (1998) a affirmé à cet effet que les techniques spectroscopiques sont rapides, moins coûteuses et non dangereuses (Pirie *et al.*, 2005). Ces techniques spectroscopiques de réflectance dans l'ultraviolet (UV), le visible (VIS), le proche infrarouge (PIR) et le moyen infrarouge (MIR) s'avèrent de bons substituts pour plusieurs méthodes de laboratoire traditionnelle utilisées pour caractériser diverses propriétés des sols agricoles (Pirie *et al.*, 2005; Janick *et al.*, 1998). En plus, ils ont l'avantage de présenter un potentiel d'adaptabilité sur le terrain (Viscarra Rossel et McBratney, 1998b). Parmi ces techniques spectroscopiques, on peut citer la spectroscopie de masse (SM), la résonance magnétique et nucléaire, le spectre de UV, du VIS, du PIR, du MIR, et de l'infrarouge thermique (IT). C'est dans cet optique que la télédétection est aussi explorée comme une excellente option pour déterminer les propriétés des sols. Les travaux de Galvão *et al.* (1997) ont montré que les corrélations entre les différentes bandes du spectre électromagnétique et les données de télédétection ont mené à une meilleure compréhension de la complexité des constituants du sol. Selon Coleman *et al.* (1991), l'estimation des variables du sol à partir des données spectrales en cartographie des sols est une bonne application potentielle et importante de la télédétection multispectrale. Schepherd et Walsh (2002) ont développé une méthode qui utilise une sorte de bibliothèque spectrale comme un moyen rapide et non destructif pour estimer les propriétés des sols, celle-ci étant basée sur les analyses de réflectance spectroscopique. Selon ces chercheurs, ces banques de données spectrales facilitent l'analyse des sols par télédétection.

2.10.1 La conductivité électrique apparente (CEA)

La télédétection est une approche en plein développement dont les résultats sont très prometteurs dans un futur rapproché pour guider efficacement la gestion des sites et des cultures spécifique à un site (Brisco *et al.*, 1998). Puisqu'elle ne représente pas pour le moment une technologie assez fiable et cohérente (Brisco *et al.*, 1998), les variables auxiliaires apparaissent comme des supports à la télédétection pour mieux cartographier certaines propriétés de sols en particuliers le DSP et la CFP. Par exemple, la conductivité électrique apparente (CEA) des sols mesurée à partir de la résistivité électrique ou de l'induction électromagnétique, est une variable ou une donnée spatiale de sol bien adaptée à la précision de

mesures de propriétés de sols. Elle est très facile à mesurer (Corwin et Lesch, 2003) et est typiquement corrélée avec la texture du sol, la capacité de rétention en eau du sol (Williams et Hoey, 1987). La CEA est un intégrateur de plusieurs propriétés de sols comme la salinité (Lesch *et al.* 1995), la texture (Williams et Hoey, 1987) le taux de matière organique (Banton *et al.*, 1997), la teneur en argile et la teneur en eau suivant la profondeur de matériaux de sol conductible (Doolittle *et al.*, 1994; Kitchen *et al.*, 2005).

2.10.2 Les modèles numériques d'élévation (MNE)

Depuis que la distribution spatiale des propriétés de sols est importante pour plusieurs applications (Young et Hammer, 2000a), des approches alternatives sont requises (Mckenzie *et al.*, 2000; Cook *et al.*, 1996; Moore *et al.*, 1993). Plusieurs propriétés de sol et les relations existantes entre elles sont souvent évaluées sur de petites surfaces, mais pour mieux comprendre ces relations par rapport au pédo-paysage, plusieurs modèles rigoureux sont requis (Gessler et Chadwick, 1997). Les modèles numériques d'élévation (MNE) sont une des plus importantes applications du système d'information géographique (SIG) à partir desquelles les propriétés sont dérivées et utilisées pour caractériser les formes de relief (Dobos *et al.*, 2000). Un MNE est une représentation de la topographie (altimétrie et /ou bathymétrie) d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur. Cette variable auxiliaire mesurée grâce à un SIG constitue une composante importante de la réalité du pédo-paysage. Chaplot *et al.* (2000) ont utilisé les MNE et des données pédologiques pour étudier des modèles de distribution de sols et améliorer la prédiction de l'hydromorphie des sols. Odeh *et al.* (1995) ont utilisé les MNE comme variable auxiliaire en co-krigeage pour réaliser une cartographie des propriétés des sols à grande échelle. Dobos *et al.* (2000) ont combiné des données satellitaires AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) au MNE pour cartographier le potentiel de drainage des sols. Ziadat (2005) a analysé les MNE pour prédire les propriétés des sols d'un site de superficie relativement grande.

2.11 La télédétection et ses origines

La conception même de l'entité que l'on nomme sol dépend de sa définition en tant qu'objet d'étude et, par conséquent, de la discipline par laquelle on l'approche. Pour le géophysicien, le sol désigne tout terrain meuble recouvrant le substrat rocheux solide. Pour les pédologues, la

partie non consolidée de la croûte terrestre se désigne sous le nom de régolithe, le sol étant cette portion du régolithe qui subit l'action du climat et des organismes. C'est aussi un corps naturel composé de matériel minéral et organique qui évolue sous l'action du climat et des organismes vivants. Il se distingue du régolithe par sa teneur en matière organique, l'abondance d'organismes et de racines de plantes, une altération plus ou moins intense des minéraux et la présence d'horizons caractéristiques (Buol *et al.*, 1989). Cependant, de nombreux scientifiques stipulent que le sol est un corps doué non seulement de capacités électromagnétiques mais encore est le siège d'un échange intense de matière et d'énergie perceptible, de proche, ou à distance, entre l'air, l'eau et les roches. C'est dans cet ordre d'idée que la télédétection devient de plus en plus un outil indispensable 1) à l'identification des types de sols, en vue de leur cartographie, 2) à la connaissance de la dynamique de divers facteurs hydriques et thermiques, 3) à l'évaluation du niveau de dégradation en vue d'assurer la conservation de la ressource-sol, 4) à la quantification des processus érosifs qu'ils soient éoliens ou hydriques, 5) à l'interprétation des unités de pédo-paysage, 6) à la cartographie des régions mal connues ou encore 7) à la prévision du comportement des sols agricoles face aux changements climatiques (Bonn et Escadafal, 1996). C'est donc l'occasion pour nous de clarifier le terme «télédétection» en tant qu'outil de la pédologie moderne. Déjà en 1972, l'éditorial du premier numéro de la revue du Centre canadien de télédétection rapportait les propos suivants : « Bien qu'il y ait quelques désaccords pour savoir ce qu'on entend exactement par télédétection, le terme est employé généralement pour l'étude de l'environnement de surface, pour laquelle on utilise des systèmes actifs ou passifs, aéroportés ou spatioportés, afin de capter le rayonnement dans les diverses régions du spectre électromagnétique ». Le terme « télédétection » a été officialisé en 1973 comme : « Détection à distance (en anglais, remote sensing) » (Paul *et al.*, 1991). Il est aussi employé comme un « grand générique » dans le Thésaurus des domaines de la Banque de terminologie du Québec (BTQ), (Paul *et al.*, 1991). C'est la science de la technique qui consiste à collecter des informations au sujet d'un objet - ici le sol - avec un dispositif d'enregistrement n'ayant aucun contact physique avec cet objet. Elle est principalement limitée aux méthodes enregistrant l'énergie électromagnétique réfléchie ou rayonnée en comparaison à celles qui impliquent une pénétration dans le sol. Cette technique emploie comme dispositif de captage d'information des caméras, des détecteurs infrarouges, des scanners multispectraux, des récepteurs de micro-ondes et des systèmes radar. Elle englobe donc tous les moyens utilisés

pour l'observation de la terre à distance : photos aériennes, images multispectrales, radar, thermographie (Lozet et Mathieu, 1990).

2.12 Télédétection et spectre de réflectance des sols

Une des premières études portant sur la quantification de la réflectance des sols et sur la définition des différences perçues entre les spectres de réflectance des sols grâce à la télédétection proximale qui utilise les rayonnements du proche infrarouge (PIR) et du visible (VIS) a été conduit par Condit (1970; 1972). Cet auteur a recueilli 160 échantillons de sol dans 36 états américains et a classifié les courbes spectrales des sols en trois types généraux. Cependant, à l'époque, aucune tentative n'a encore été faite pour associer spécifiquement les propriétés spectrales des sols aux différentes propriétés physiques et chimiques des sols. Stoner *et al.* (1980) ont réussi à recueillir des échantillons représentant plus de 240 séries de sols. Ceux-ci appartenaient à 17 classes de régime de température-humidité. Après avoir mesuré la réflectance de ces sols dans le visible et le proche infrarouge, ils ont pu catégoriser les courbes spectrales de ces sols en cinq formes de base pour ensuite les relier à cinq groupes distincts de sol à savoir : 1) sols à dominance organique, 2) sols minéraux altérés, 3) sols contenant légèrement de fer, 4) sols à faible taux de matière organique et 5) sols à dominance de fer.

Dès que la télédétection s'est établie comme un nouveau champ de recherche chez les scientifiques des sols, Baumgardner *et al.* (1985) ont étudié les propriétés de réflectance des sols et ont confiné plus particulièrement leur discussion aux couleurs des sols, aux principales limitations de la télédétection et aux effets spécifiques des différents constituants sur la réflectance. Plus tard, Pierce et Nowak (1999) ont discuté de l'utilité de la télédétection des sols en l'agriculture de précision. Moran *et al.* (1997), au cours de leur recherche, ont inclus plusieurs sections de la télédétection des propriétés des sols dans leur discussion générale et sur la détection à distance basée sur les images dans la gestion précise des récoltes et des fourrages. Ben-Dor *et al.* (2003), suite à l'utilisation de senseurs hyperspectraux, ont fait une revue portant sur la télédétection quantitative des propriétés des sols.

2.13 Télédétection et science du sol

En termes de technique de détection, des études plus anciennes ont déjà utilisé des images satellitaires multispectrales pour l'étude de la cartographie des sols (Ge *et al.*, 2006). Cependant, ces premières entreprises n'ont pas été jugées appropriées pour l'agriculture de précision car ces images ne pouvaient généralement pas donner de l'information quantitative concernant les propriétés des sols. Mais aujourd'hui, l'étude des sols agricoles basée sur la lumière qu'ils émettent, technique appelée spectroscopie, trouve une application en pédologie et en agriculture où elle est essentielle à l'analyse des sols à distance, à la conservation des sols et du milieu, à la prévention des comportements des sols agricoles dans un contexte de changement climatique et de protection de l'environnement.

L'utilisation des spectromètres de laboratoire pour obtenir des données hyperspectrales des sols est de plus en plus courante. Pour cela, il faut que l'information spectrale des propriétés des sols puisse être quantitativement déterminée. Ge *et al.* (2006) rapportent que 90 % des études ont utilisé des longueurs d'onde de la région du visible (VIS) et du proche infrarouge (PIR) du spectre électromagnétique alors que plusieurs signatures spectrales associées aux propriétés des sols se situent dans le moyen infrarouge (MIR) ou dans l'infrarouge thermique (IRT). Ces observations rendent les régions du VIS, du PIR et du MIR très informatives et potentiellement diagnostiques pour beaucoup de propriétés de sol. D'autre part, leur étude démontre que l'analyse des données de télédétection (ratio des bandes, indice de végétation, analyse discriminante, classification des images, etc) est particulièrement appropriée pour les images acquises en conditions de sols nus à partir d'un satellite ou autres plateformes aériennes. D'autre part, Ben-Dor (2002), dans une revue de littérature portant sur la télédétection quantitative des propriétés des sols montrent l'utilité des senseurs hyperspectraux (senseurs ayant une fine résolution spectrale, i.e. des longueurs d'onde).

Plusieurs travaux de recherche sont devenus de nos jours des bases solides d'un nouveau paradigme de méthodes non destructives pour quantifier les propriétés des sols (Coleman *et al.*, 1991; Ben-Dor et Bannin, 1995; Madeira Netto, 1996). Ainsi, l'usage des longueurs d'onde de l'UV (250-400 nm), du VIS (400-700 nm) et du PIR (700-2500 nm) permet de prédire plusieurs propriétés des sols comme le pH, la conductivité électrique (CE), le carbone organique, le carbone total., l'azote, le sable, l'argile, le limon, la capacité d'échange cationique (CEC), et

d'autres paramètres de fertilité comme le manganèse, le fer, le cuivre et le zinc à des niveaux de précision d'estimation variables (Dala et Henry, 1986; Moora *et al.*, 1991; Ben-Dor et Bannin 1995; Chang *et al.*, 2001; Islam *et al.*, 2003; Viscarra Rossel *et al.* 2006a; Pirie *et al.*, 2005; Fontes et Carvalho, 2005; Nanni et Demattê, 2006; Ge *et al.*, 2006). Les tableaux 4, 5 et 6 présentent une compilation de la littérature documentant la prédiction de plusieurs propriétés pédologiques à l'aide de la télédétection pour différentes longueurs d'onde mesurées par des senseurs installées sur différentes plateformes (satellitaire, aéroportée, laboratoire). Parmi ces propriétés, le pH, le Ca, le Mg, la CEA, la matière organique du sol (MOS) et la texture ont été étudiées et prédites grâce à la télédétection par de nombreux auteurs durant les deux dernières décennies (Tableau 4).

Parmi les différentes plateformes de télédétection qui existent, plusieurs recherches ont utilisé les images satellitaires, les images aéroportées, les spectromètres de laboratoire. Ces recherches ont fait usage de plusieurs types de senseurs comme les spectromètres de champs, les senseurs multispectraux et hyperspectrales pour l'étude et la prédiction de diverses propriétés de sol. Ces divers senseurs sont dotés de longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique. L'UV, le PIR, le MIR, l'IT et le M.O sont les plus utilisées pour l'étude et la prédiction de diverses variables des sols agricoles (Tableau 5). Quant au tableau 6, il montre les possibilités d'études et de prédiction des propriétés de sol liées à la texture et à la capacité de fixation du P comme le fer et l'aluminium. Ces propriétés peuvent être prédites au moyen du MIR, du PIR, du VIS-PIR.

Tableau 3 : Compilation dans la littérature de propriétés physico-chimiques de sol prédites à l'aide de la télédétection.

Auteurs	P	k	Ca	Mg	Na	N	pH	CEA	CEC	MOS	Argile	Limon	Sable	Autres
Coleman <i>et al.</i> , 1991										x	x	x	x	
Morra <i>et al.</i> , 1991						x								
Abdel-Hamid., 1993									x	x	x		x	Oxyde de Fe
Coleman <i>et al.</i> , 1993										x	x	x	x	
Sudduth et Hummel., 1993									x	x	x			
Ben-Dor et Bamin., 1995									x	x	x			
Coleman et Tadesse., 1995										x	x	x	x	
Hummel <i>et al.</i> , 1996									x					
Palacios-Orueta et Ustin., 1998										x	x	x	x	Fe
Ehsani <i>et al.</i> , 1999						x								Types de sol
GopalaPillai et Tian., 1999														
Malley <i>et al.</i> , 1999	x	x	x	x	x		x	x						
Varvel <i>et al.</i> , 1999	x									x				
Barnes et Baker., 2000											x	x	x	
Chang <i>et al.</i> , 2001	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	
Ehsani <i>et al.</i> , 2001						x								
Hummel <i>et al.</i> , 2001										x				
Merry et janick., 2001						x	x	x	x		x	x	x	
Thomasson <i>et al.</i> , 2001	x	x	x	x	x		x				x	x		
Slaughter <i>et al.</i> , 2001														
Kaleita et Tian., 2002										x				
Lobell et Asner., 2002														
Cozzolino et Moron., 2003		x	x	x								x	x	Fe
Lee <i>et al.</i> , 2003	x	x	x	x			x			x				
Leon <i>et al.</i> , 2003	x	x	x	x			x				x	x	x	
Stangeland <i>et al.</i> , 2003	x	x	x	x			x							
Bogrekci et Lee., 2004	x													
Bogrekci et Lee., 2004	x													
Bajwa et Tian., 2005	x	x	x	x			x							
Stamatiadis <i>et al.</i> , 2005	x	x	x	x	x		x							
Ge et al., 2006	x	x	x	x	x	x					x	x		
Waiser <i>et al.</i> , 2008											x			

Propriétés de sol : P = phosphore, K = potassium, Ca = calcium, Mg =magnésium, Na = sodium, N = azote, MOS = matière organique du sol, CEA = conductivité électrique apparente, CEC = capacité d'échange cationique, CH = contenu en humidité, C org = carbone organique, Mn = manganèse, Fe = Fer, C total = carbone total

Tableau 4 : Compilation dans la littérature de plateformes, types de senseurs et régions spectrales utilisés pour la prédiction de propriétés de sol à l'aide de la télédétection.

Auteurs et années	Plateforme				Senseur			Region spectrale				
	Sat	Aér	Lab	Champ	Multi	Hyper	UV	VIS	PIR	MIR	IT	MO
Dalal et Henry, 1986			x		x				x			
Agbu <i>et al.</i> , 1990	x		x		x			x	x			
Coleman <i>et al.</i> , 1991			x	x	x				x	x	x	
Morra <i>et al.</i> , 1991			x			x			x			
Coleman <i>et al.</i> , 1993	x		x		x				x	x	x	
Sudduth et Hummel, 1993			x			x			x			
Ben-Dor et Banin, 1995			x			x			x			
Coleman et Tadesse, 1995		x			x	x			x			
Hummel <i>et al.</i> , 1996				x	x		x		x			
Galvao <i>et al.</i> , 1997			x				x		x			
Palacios-Orueta et Ustin, 1998						x			x			
Ehsani <i>et al.</i> , 1999			x		x	x			x			
GopalaPillai et Tian, 1999		x	x			x			x			
Malley <i>et al.</i> , 1999			x						x			
Varvel <i>et al.</i> , 1999		x			x	x			x			
Barnes et Baker, 2000	x	x			x				x		x	
Chang <i>et al.</i> , 2001			x			x			x			
Ehsani <i>et al.</i> , 2001			x			x				x		
Hummel <i>et al.</i> , 2001			x			x			x			
Slaughter <i>et al.</i> , 2001			x			x			x			
Thomasson <i>et al.</i> , 2001	x		x		x	x			x			
Cozzolino et Moron, 2003			x						x			
Hutchinson, 2003	x								x			
Lee <i>et al.</i> , 2003			x			x			x			
Leon <i>et al.</i> , 2003		x	x						x			x
Odhambo <i>et al.</i> , 2003	x		x		x				x			x
Stangeland <i>et al.</i> , 2003			x			x			x			
Bajwa et Tian, 2005		x	x			x			x			
Bogreski et Lee, 2005a			x			x			x			
Bogreski et Lee, 2005b			x			x	x		x			
Stamatiadis <i>et al.</i> , 2005				x	x		x		x			
Kaleita <i>et al.</i> , 2005				x		x			x			
Sullivan <i>et al.</i> , 2005	x								x			
Ge et Thomasson 2006			x		x	x			x			

Plateforme : Sat.= image satellitaire, Aér.= aéroporté, Lab.= spectromètre de laboratoire, Champ= spectromètre de champ.

Types de senseurs : multi= senseur multispectral., hyper= senseur hyperspectral.

Région spectrale : UV= ultraviolet, VIS= visible, PIR= proche infrarouge, MIR= moyen infrarouge, IT= infrarouge thermique, MO= micro-onde.

Tableau 5 : Revue de littérature comparant l'efficacité de prédiction (R^2) de quelques propriétés de sol reliées à la CFP ainsi que la région spectrale utilisée dans l'ultraviolet (UV), le visible, (VIS), le proche infrarouge (PIR), et le moyen infrarouge (MIR).

Propriétés de sol	Unité	Région spectrale	Intervalle spectral (mm)	R^2	Auteurs
Al échangeable	cmol kg ⁻¹	MIR	2500-25000	0,64	Janick <i>et al.</i> , 1998
Fe libre	%	PIR	700-2500	0,49	Islam <i>et al.</i> , 2003
Fe Mehlich-3	mg kg ⁻¹	VIS PIR	400-2498	0,64	Chang <i>et al.</i> , 2001
P disponible	mg kg ⁻¹	MIR	2500-25000	0,07	Janick <i>et al.</i> , 1998
P disponible	mg kg ⁻¹	VIS-PIR	400-1100	0,81	Daniel <i>et al.</i> , 2003
Argile	%	MIR	2500-25000	0,79	Janick <i>et al.</i> , 1998
Argile	%	PIR	1000-2500	0,56	Ben-Dor et Bamin., 1995
Argile	%	VIS-PIR	400-2498	0,67	Chang <i>et al.</i> , 2001
Argile	%	PIR	700-2500	0,75	Islam <i>et al.</i> , 2003
Sable	%	VIS-PIR	400-2498	0,82	Chang <i>et al.</i> , 2001
Sable	%	UV-VIS-PIR	250-2500	0,53	Islam <i>et al.</i> , 2003
Limon	%	MIR	2500-25000	0,84	Janick <i>et al.</i> , 1998
Limon	%	VIS-PIR	400-2498	0,84	Chang <i>et al.</i> , 2001

2.14 Le spectre électromagnétique : un bref aperçu

Le spectre électromagnétique est défini par un ensemble de longueur d'onde variant du rayonnement gamma au rayonnement radio (Figure 2). Il inclut les longueurs d'onde du spectre lumineux (Figure 3). Quant à la figure 4, elle présente le spectre du visible et le spectre électromagnétique. Plus de 90 % des études en télédétection relatives aux propriétés des sols agricoles ont utilisé principalement les ondes électromagnétiques du VIS et du PIR (Ge *et al.*, 2006).

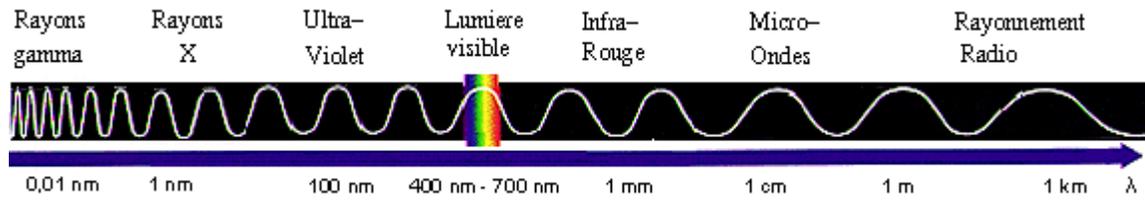


Figure 2 : Le spectre de toutes les ondes électromagnétiques.
 Source : <http://www.bioinformatics.org/oeil-couleur/dossier/lumiere.html>.

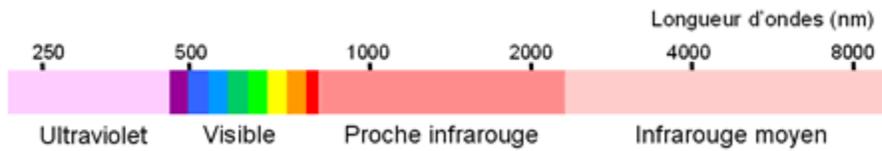


Figure 3 : Les différentes régions du spectre électromagnétique.
 Source : <http://www.bioinformatics.org/oeil-couleur/dossier/lumiere.html>.

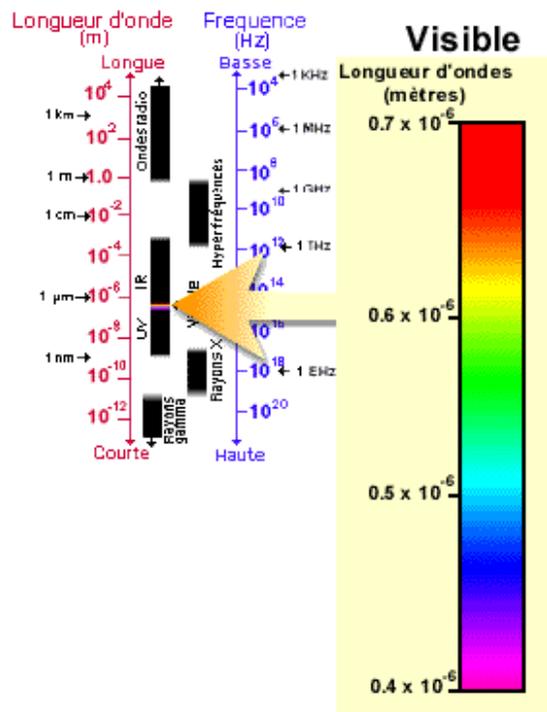


Figure 4 : Représentation détaillée de la région spectrale du visible.
 Source : http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/index_f.php.

2.15 Caractéristiques des principaux capteurs satellitaires disponibles actuellement

Il existe actuellement sur le marché plusieurs types de satellites (optiques, radar, haute résolution, faible résolution...). Le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec a dressé les caractéristiques (capteurs, type de radiomètre, bandes spectrales, résolution spectrale, dimension d'une scène, fréquence de passage, vocation du satellite...) de ces différents satellites. Ces caractéristiques varient selon qu'il s'agisse d'un satellite optique, d'un satellite radar, d'un satellite à haute résolution ou à faible résolution.

¹ De toutes les plateformes de télédétection qui existent, ce sont les satellites qui sont les plus utilisés pour des études agronomiques, de sols ou de l'environnement. Parmi ces satellites, on distingue des satellites optiques, des satellites radar, des satellites à hautes résolutions et des satellites à faibles résolutions.

La résolution spatiale (dimension des pixels) de certains des capteurs satellitaires est suffisamment fine pour que l'information spectrale générée par ces capteurs soit utilisée pour l'étude des propriétés des sols agricoles à l'échelle de la parcelle (échelle $\geq 1 : 10\ 000$, NIP1). C'est l'exemple du capteur ASTER du satellite TERRA qui offre une résolution spatiale de 15 m dans la région du VIS et du PIR pour ses trois premières bandes (vert, rouge et proche infrarouge), de 30 m dans la région du MIR (six bandes) et de 90 m dans l'IRT (5 bandes), pour une couverture de 60 km x 60 km. Sa fréquence de passage offre un avantage par rapport à la plupart des satellites optiques dans le sens qu'elle permet un suivi plus régulier dans le temps du territoire observé ou des phénomènes à l'étude. Les images issues de Landsat 7 ne sont pas bien adaptées à cette échelle d'intervention car la résolution spatiale est de 15 m seulement en mode panchromatique, alors qu'elle est de 30 m pour les bandes dans les régions du VIS, PIR, MIR et de 60 m dans l'IRT. Parmi les satellites à haute résolution spatiale, IKONOS-2 et QUICKBIRD-2 offre une résolution au sol de 4 m et de 2.5 m respectivement. Ce sont donc des résolutions très bien adaptées à une étude à l'échelle de la parcelle agricole. Le satellite ORBEVIEW-4 serait aussi intéressant pour des études à l'échelle de la parcelle si on parvient à le mettre en orbite après son dernier échec de lancement. Il offrirait une fréquence de passage

¹ Il est possible de consulter ces différentes caractéristiques de capteurs à l'adresse suivante : <http://www.mrn.gouv.qc.ca/territoire/geomatique/geomatique-teledetection-satellite.jsp>.

de 3 jours ainsi qu'une résolution spatiale très fine de 8 m et de 1m dans le panchromatique. Malgré tout, la résolution spectrale de ces capteurs n'est pas toujours adéquate. Les applications de la télédétection en agriculture et en science du sol bénéficieraient d'une approche hyperspectrale (Liu *et al.*, 2008; Perron *et al.* 2008) qui permettrait l'observation des propriétés de sol à l'aide de plusieurs bandes finement définies. Par exemple, on peut observer le comportement du fer ou de la matière organique avec plusieurs longueurs d'onde à la fois. La section suivante présente brièvement deux satellites dont les caractéristiques sont intéressantes pour des études agricoles et pédologiques.

2.16 Les caractéristiques des capteurs ASTER et IKONOS

2.16.1 ASTER

Les nouvelles technologies sont de plus en plus utilisées par les pédologues, les agronomes et les autres scientifiques du sol pour améliorer leurs connaissances. C'est dans cette optique que la télédétection apparaît comme un outil efficace d'une part, pour mieux comprendre la variabilité des propriétés et du fonctionnement des sols à l'intérieur des parcelles agricoles, pour, par la suite, réaliser la cartographie numériques de ces diverses propriétés. ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) est l'un des cinq capteurs installés sur le satellite Terra en observation autour de la terre depuis décembre 1999. Terra est le résultat d'une coopération entre la NASA et le gouvernement japonais dans le cadre du programme d'observation de la terre EOS (*Earth Observation System*). La plateforme Terra possède une orbite polaire et héliosynchrone du matin avec un passage à l'équateur à 10 h 30 heure locale à une altitude de 705 km avec un angle d'inclinaison de $98^{\circ}2'$. Il effectue un tour complet tous les 16 jours et se déplace à la vitesse de $6,7 \text{ km s}^{-1}$. Les paramètres de l'orbite sont les mêmes que celles de Landsat 7 (ETM⁺).

Le capteur ASTER présente 14 bandes réparties sur trois systèmes de capteurs indépendants couvrant le domaine du visible (VIS), du proche infrarouge (PIR), du moyen infrarouge (MIR), et de l'infrarouge thermique (IRT). Chaque télescope offre une résolution spatiale spécifique, soit de 15 m dans le VIS et PIR, 30 m dans le MIR et 90 m dans l'IRT avec une couverture au sol de 60 X 60 km (Abrams *et al.*, 2005). Plusieurs bandes du VIS et du PIR s'avèrent particulièrement efficaces pour estimer le contenu en matière organique de la surface du sol

(Stephens *et al.*, 2005). Les bandes du MIR permettent de caractériser plusieurs propriétés des sols dont la granulométrie et la teneur en eau du sol tandis que les bandes de l'IRT permettent d'estimer la température de la surface des sols ainsi que leur humidité (Abrams *et al.*, 2005). Enfin, grâce à la présence de deux télescopes dont le premier à visée Nadir capte les données selon 3 bandes spectrales (bande 1-2-3N) et la visée arrière d'un second télescope captant les données selon une seule bande spectrale (bande 3B), il est également possible de produire des images en 3D et des modèles numériques d'élévation (MNE), dont la précision peut varier de 7 à 10 m d'altitude, selon la présence ou non de mesures précises au sol (Abrams *et al.*, 2005). Le tableau 7 présente les caractéristiques des bandes spectrales disponibles avec les images ASTER.

Tableau 6 : Région spectrale des bandes du capteur ASTER.

Caractéristiques	Bande spectrale	Rangée spectrale (µm)	Résolution au sol (m)	Couverture au sol (km)	Stockage du signal
VPIR ¹	1	0,52-0,60	15	60	8 bits
	2	0,63-0,69			
	3N	0,78-0,86			
	3B	0,78-0,86			
MIR ²	4	1,600-1,700	30	60	8 bits
	5	2,145-2,185			
	6	2,185-2,250			
	7	2,235-2,850			
	8	2,295-2,365			
IRT ³	9	2,360-2,430	90	60	12 bits
	10	8,125-8,475			
	11	8,475-8,825			
	12	8,925-9,275			
	13	10,25-10,950			
	14	10,95-11,650			

¹ : VPIR : visible et proche infrarouge

² : MIR : moyen infrarouge

³ : IRT : Infrarouge thermique

Source : *Abrams et al.*, 2005

2.16.3 IKONOS-2

IKONOS-2 demeure également un satellite d'observation à très haute résolution spatiale. Le radiomètre de ce capteur permet d'offrir des images couvrant un champ d'observation de 11 km (fauchée) avec une résolution spatiale de 1 m en mode panchromatique et de 4 m en mode multispectral. Toutefois, la principale limitation de ce capteur est sa faible largeur de fauchée (Tableau 7), un point particulier de la surface terrestre qui n'est survolé que tous les 35 jours. Cependant, la possibilité de dépointage du capteur permet de réduire ce délai à 3 jours au besoin.

Tableau 7 : Caractéristiques principales du radiomètre du satellite IKONOS-2.

Mode	Canal	Bande spectrale	Résolution spatiale	Fauchée
MULTISPECTRAL	1	0,45-0,53 μm (bleu)	4 m	11km
	2	0,52-0,61 μm (vert)	4 m	11km
	3	0,64-0,72 μm (rouge)	4 m	11km
	4	0,77-0,88 μm (PIR)	4 m	11km
PANCHROMATIQUE	0	0,45-0,90 μm (VIS+PIR)	1 m	11km

Sources : <http://www.educnet.education.fr/orbito/system/ikonos/iko00.htm>.

3. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

3.1 Cadre du projet de recherche

3.1.1 Contexte de l'étude

La gestion durable des ressources à l'intérieur d'un bassin versant agricole est un enjeu majeur en recherche. Cette démarche passe par la connaissance approfondie des sols présents dans le bassin entre autres. Or, la plupart des études pédologiques réalisées au Québec datent de plus de 40 ans en plus de contenir des informations dont la précision est insuffisante à l'échelle d'intervention (microbassin, ferme, parcelle). Pour cette raison, une mise à jour et une mise à niveau de l'information pédologique disponible est requise pour une grande partie du territoire québécois. L'étude des sols par les méthodes traditionnelles est longue et coûteuse. Or les nouvelles technologies telles les systèmes de positionnement par satellite (GPS), les systèmes d'information géographique (SIG), la télédétection, la prospection électrique des sols (conductivité électrique apparente du sol) et les modèles numériques d'altitudes (MNE) peuvent être utilisés à différentes échelles pour analyser, caractériser et prédire les propriétés des sols de manière rigoureuse, précise et moins coûteuse. Ainsi, dans le cadre du projet PICG (Programme des initiatives connexes du gouvernement), le bassin versant du Bras d'Henri a été choisi comme site d'étude pour la réalisation et la mise à jour de la carte des sols à l'aide des données d'observation de la terre et des modèles numériques d'élévation. La présente étude doctorale s'inscrit dans la deuxième phase de ce projet et porte sur la prédiction de la distribution spatiale de diverses propriétés associées à la capacité de fixation du phosphore (CFP) de la couche de surface des parcelles agricoles fortement amendées avec du fumier et du lisier. Ces parcelles sont situées dans un microbassin versant faisant partie d'un réseau national (WEBs) de suivi de la qualité de l'eau et des sols suite à l'implantation de pratiques de gestion bénéfiques (PGB).

3.1.2 Localisation et description du site à l'étude

Le site d'étude est composé de 3 champs contigus totalisant 16 ha situés dans un microbassin versant de 236 ha appartenant successivement aux bassins versants des rivières Bras d'Henri, Beurivage et Chaudière (Figures 5 et 6). Un tiers de ces champs se retrouvent dans le comté de Lotbinière tandis que les deux autres tiers se retrouvent dans le comté de Dorchester. Le bassin

versant du Bras d'Henri est situé dans la région administrative de Chaudière-Appalaches sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, à environ 50 km au sud de la ville de Québec. Il s'étend sur une superficie approximative de 167 km². Il est limité au nord par le fleuve Saint-Laurent, à l'ouest par les comtés de Lotbinière, au sud par le comté de Beauce et de Mégantic et à l'est par ceux de Lévis et de Dorchester (Baril et Rochefort, 1957, Laplante, 1963; Pageau, 1975; Ouellet *et al.*, 1995). Les coordonnées centrales du site à l'étude sont : 46°29'N et 71°14'O.

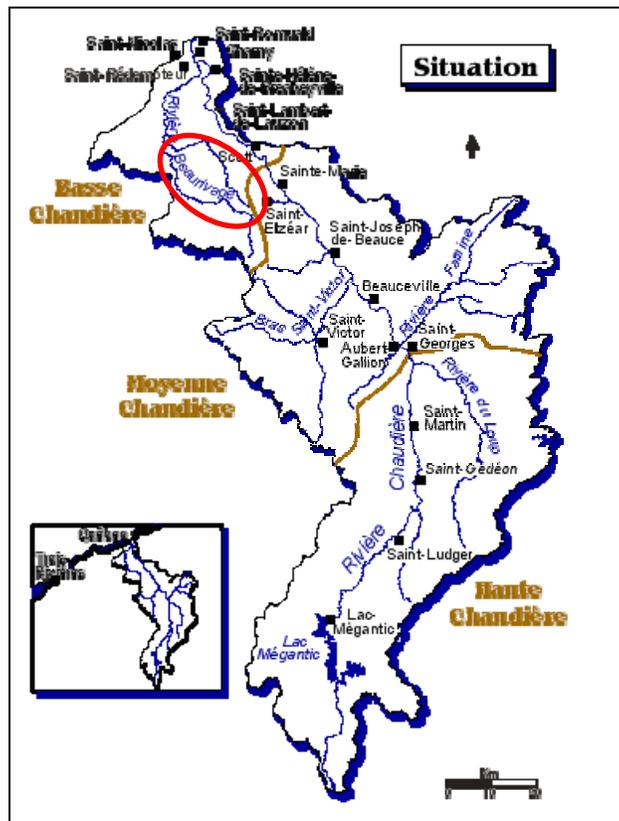


Figure 5 : Localisation du Bras d'Henri (encerclée en rouge) dans l'une des trois zones physiographiques du bassin versant de la rivière Chaudière, soit basse, moyenne et haute Chaudière.

(Source : www.mddep.gouv.qc.ca, 2007).

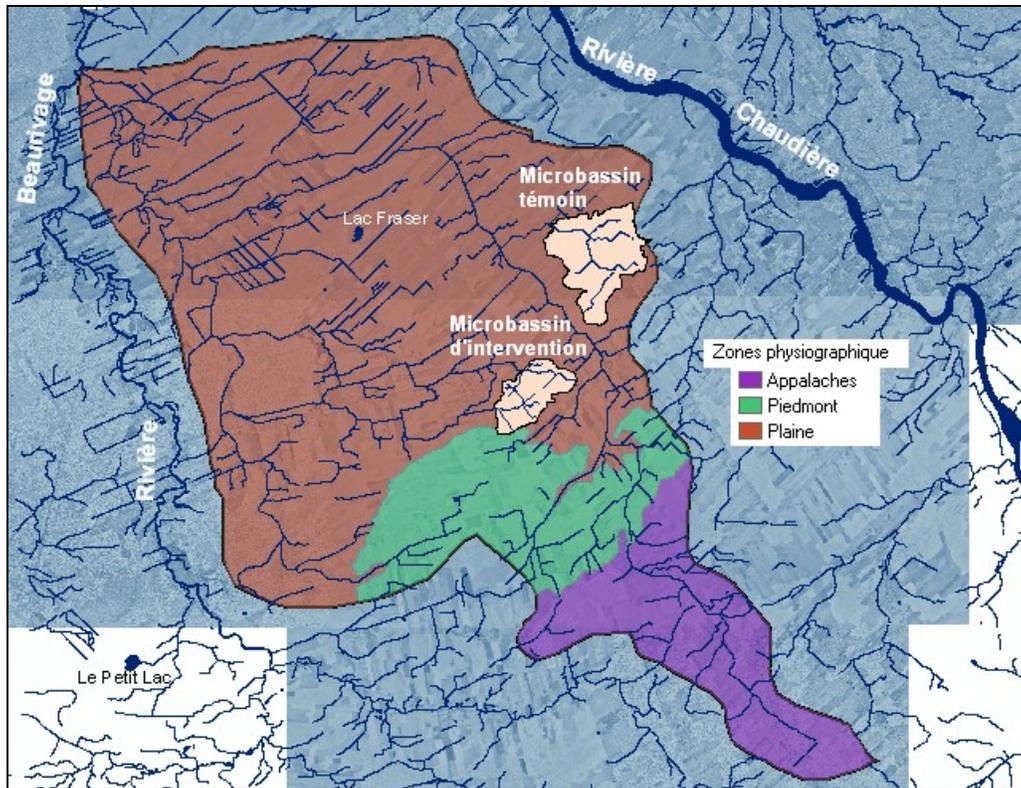


Figure 6 : Localisation du bassin versant du Bras d'Henri, des deux microbassins expérimentaux et des trois zones physiographiques : Appalaches, Piemont et Plaines. (Source : Perron, 2005).

Le bassin versant du Bras d'Henri couvre deux régions physiographiques majeures, les Appalaches (sud), caractérisée par une topographie ondulée (5 %) et les Basses-Terres du Saint-Laurent (nord), définies par un relief très plat (0-5 %). Une zone intermédiaire, le Piedmont présentant des pentes de 0-9 % a aussi été délimitée dans ce secteur de la Plaine du Saint-Laurent. Les deux microbassins expérimentaux (intervention et témoin) sélectionnés pour le projet WEBS se situent à l'intérieur du bassin du Bras d'Henri dans la région physiographique des Basses-Terres du Saint-Laurent (Figure 6). Le microbassin d'intervention (MBI) occupe une superficie approximative de 2,35 km² alors que le microbassin témoin (MBT) est d'une superficie d'environ 4,23 km². Les trois parcelles à l'étude totalisant 15,75 ha, sont situées dans le microbassin d'intervention, près de son exutoire.

3.1.3 Conditions climatiques de la région

La région à l'étude est caractérisée par des hivers tempérés froids dont la température moyenne hivernale avoisine $-9,4^{\circ}\text{C}$ tandis que la température moyenne de la saison de végétation est environ $16,6^{\circ}\text{C}$. Celle-ci dure en moyenne 159 jours à compter du mois de mai jusqu'au mois d'octobre (Baril et Rochefort, 1957), et la période du gel débute autour du mois de novembre et peut durer jusqu'à la fin du mois d'avril. Les précipitations annuelles sous forme de pluie sont d'environ 873 mm et celles de neige sont d'environ 320 cm (Khaldoune, 2006).

3.1.4 Problématique agro-environnementale de la région

La région agricole du bassin versant du Bras d'Henri est considérée comme l'une des plus intensives en termes de production animale de la province de Québec. L'intensité de la production porcine, bovine et laitière et l'augmentation du nombre d'unité animale à l'hectare à l'intérieur du bassin versant s'accompagne d'une augmentation des quantités de déjections animales qui, jumelée à la pratique de la monoculture industrielle de maïs requis pour satisfaire l'alimentation animale, conduit à l'accroissement des risques de contamination des eaux de surface par érosion hydrique et transport des nutriments (en particulier P et N), des pesticides et des particules par ruissellement.

Dans le but de faire du Canada le chef de file mondiale en matière de qualité des aliments, d'innovation et d'une agriculture respectueuse de l'environnement, le gouvernement fédéral et les gouvernements provinciaux et territoriaux ont émis en 2002, un cadre stratégique global pour l'agriculture du Canada. Un des volets environnementaux soutenu par plusieurs programmes d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) est appelé *Programme de couverture végétale du Canada*. Un des objectifs du *Programme de couverture végétale du Canada* est d'aider les producteurs agricoles à adopter des pratiques de gestion bénéfiques (PGB) ou (WEBs) pour minimiser les impacts environnementaux relevant de l'agriculture et l'élevage. Ainsi, à travers tout le Canada, sept ensembles de microbassins hydrographiques ont été sélectionnés dans le but d'évaluer ce programme d'une durée de quatre ans (2004-2008). Au Québec, c'est le grand bassin hydrographique de la rivière Chaudière contenant la paire de microbassins (MBI et MBT) et situé dans les comtés de Saint-Narcisse-de-Beaurivage et de Saint-Bernard qui sont choisis (Figure 6). D'une façon générale, le grand bassin hydrographique de la rivière Chaudière est dominé à 63 % par la forêt (MEN, 2002b).

Cependant, elle fait partie des trois grands bassins ou territoires agricoles les plus intensifs de la province du Québec, les deux autres étant l'Assomption et la Yamaska (MENV, 2002c). Le cheptel de la région est de 178 000 unités animales (UA), ce qui correspond à 9,5 % du cheptel québécois. Il est composé de 93 % de bovins et de porcs, ce qui montre l'importance des fermes d'élevage (MENV, 2002b). Par conséquent, une grande quantité de déjections animales est générée pour une petite surface notamment dans la partie aval du bassin où la densité animale est une des plus grande au Québec avec un cheptel de 178 000 unités animales (UA), équivalant à 9,5% du cheptel québécois et composé à 93 % de bovins et de porcs (Belzile, 2005). Cette grande concentration de production animale affecte sans doute la qualité des eaux de la région. Le ministère de l'environnement du Québec a qualifié la qualité de l'eau de douteuse à très mauvaise quant à son indice de qualité bactériologique et physico-chimique (IQBP). Le sous-bassin de la rivière Beauvillage, drainé par la rivière du Bras d'Henri est particulièrement touché par la contamination d'origine agricole (MENV, 2002d). Malgré la diminution de la concentration en phosphore en 1996 par rapport à la période de 1988 à 1990, le phosphore demeure l'élément limitant la qualité de l'eau dans les deux rivières (Beauvillage et Bras d'Henri) (MENV, 2002d). Dans le cadre des PGB, diverses pratiques agricoles sont expérimentées dans le MBI (rotation des cultures, aménagement de bandes riveraines, implantation des haies brise-vent, aménagement des fossés, aménagement du système de drainage, application de lisier en post-levée des cultures, application à dose réduite de pesticides...) sur toute la durée du projet. Dans le MBT, il n'y pas de changement des pratiques agricoles, afin de comparer l'impact des PGB sur la qualité de l'eau de surface, tel que mesurée à l'exutoire de ces deux microbassins expérimentaux.

3.1.5 Conditions pédologiques et topographiques du bassin versant du Bras d'Henri

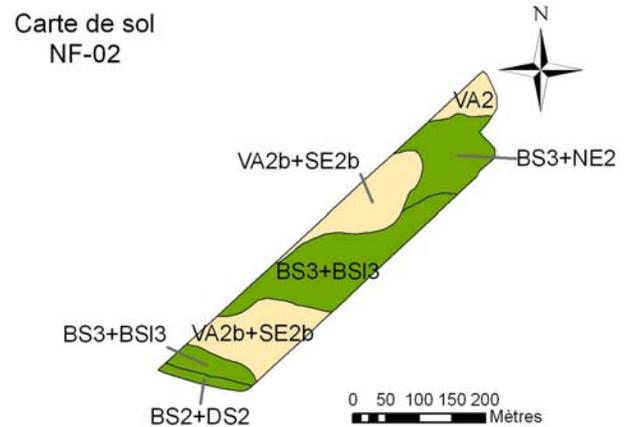
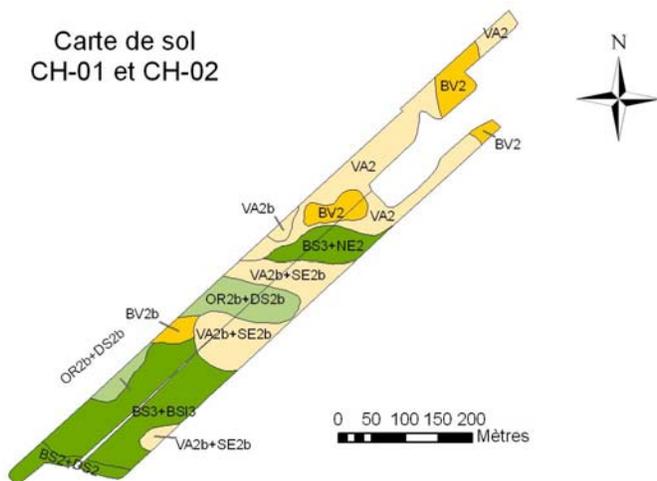
Les sols du bassin versant du Bras d'Henri sont bien diversifiés et la topographie est très variée, ce qui confère au bassin plusieurs micro-climats pédologiques car le relief et le drainage influencent la température et le régime hydrique de ces sols (Khaldoune, 2006). On retrouve dans le bassin à l'étude des sols représentatifs des deux régions physiographiques identifiées précédemment.

Ainsi au nord, les Basses-terres du Saint-Laurent représentant presque 94 % du bassin versant, occupent une altitude variant de 120 à 190 m. Les basses-terres du Saint-Laurent sont

caractérisées par un paysage uniforme fréquemment interrompu par des coteaux morainiques, des cordons graveleux ou sableux, des éperons rocheux et de nombreuses dépressions occupées par des milieux humides (Lamontagne et Nolin, 1997). Ceci confère au relief une allure ondulée (2 à 5 % de pente) ou faiblement à moyennement vallonnée (5 à 16 %). L'écoulement des eaux excédentaires particulièrement aux endroits où le sous-sol est constitué de till imperméable et pierreux est perturbé par ce type de relief. Les dépôts sont d'origine marine et parfois on y retrouve des graviers disposés en gradins successifs. Ces dépôts sont constitués de sols sableux ou graveleux et acides. Au fond des cuvettes peu profondes, on retrouve des sédiments fins qui couvrent de faibles étendues. Ce sont des apports lacustres ou fluvio-lacustres. D'une façon générale, la texture de ces sols varie du loam sableux à loam limoneux. La texture de la roche mère des sols sédimentaires est généralement limoneuse-fine, parfois un peu plus lourde. On ne retrouve pratiquement pas de pierre dans les profils de ces sols, ce qui n'empêche pas de rencontrer parfois de grands blocs erratiques à la surface du sol. On y observe majoritairement des sols imparfaitement drainés à mal drainés. Au sud, les montagnes des Appalaches présentent une altitude variant de 190 à 375 m dans la partie occupée par le bassin versant du Bras d'Henri. Seize caténas de sols ont été proposées par Nolin et Laflamme (1994) pour expliquer la distribution des sols dérivés de till de cette partie des Appalaches; deux d'entre elles sont présentes dans le bassin versant. Dans la zone appalachienne, les phénomènes de la glaciation se concrétisent dans la présence de tills et de dépôts fluvio-glaciaires : les premiers ayant été laissés par les glaciers lors de leur passage et les seconds entraînés et déposés pêle-mêle par les eaux de fonte des glaciers. La texture des tills appalachiens est généralement un loam sableux tandis que celle des matériaux fluvio-glaciaires varie de gravier à sable graveleux.

3.1.6 Conditions pédologiques particulières des trois parcelles étudiées

Une étude pédologique très détaillée (Bossé, 2007) réalisée à l'échelle de 1 :10 000 selon la méthode des transects aléatoires stratifiés décrites par Nolin *et al.* (1994) a permis d'identifier à l'intérieur des trois parcelles étudiées dans le microbassin d'intervention, sept séries de sols, soit Valère, Beurivage, Des Orignaux, Neubois et Le Bras, Des Saults et Séraphine (Figure 7). Leurs principales caractéristiques sont présentées au tableau 9.



Légende de sol

Symbole	Description
BS3 + BSI3	Complexe de sols : Le Bras, loam limoneux; Le Bras, substratum loameux, loam limoneux
BS3 + NE2	Complexe de sols : Le Bras, loam limoneux; Neuboïs, loam sableux fin
BS3 + DS2	Complexe de sols : Le Bras, loam limoneux; Des Saalts, loam sableux fin
BV2	Beaurivage, loam sableux
BV2b	Beaurivage, loam sableux, 3 - 8% de pente
OR2b + DS2b	Complexe de sols : Des Orignaux, loam sableux fin, 3 - 8% de pente; Des Saalts, loam sableux fin, 3 - 8% de pente
VA2b + SE2b	Complexe de sols : Valère, loam sableux fin, 3 - 8% de pente; Séraphine, loam sableux fin, 3-8% de pente
VA2	Valère, loam sableux fin
VA2b	Valère, loam sableux fin, 3 - 8% de pente

Légende de sol

Symbole	Description
BS2 + DS2	Complexe de sols : Le Bras, loam sableux fin; Des Saalts, loam sableux fin
BS3 + BSI3	Complexe de sols : Le Bras, loam limoneux, 3-8% de pente; Le Bras, substratum loameux, loam limoneux
BS3 + NE	Complexe de sols : Le Bras, loam limoneux; Neuboïs
VA2b + SE2b	Complexe de sols : Valère, loam sableux fin, 3 - 8% de pente; Séraphine, loam sableux fin, 3 - 8% de pente
VA2	Valère, Loam sableux fin

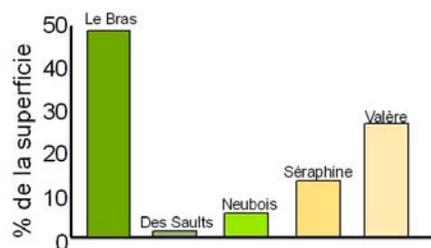


Figure 7 : Cartes pédologiques très détaillées des trois parcelles à l'étude (Bossé, 2007).

Tableau 8 : Principales caractéristiques des sept séries de sols retrouvées dans les trois parcelles à l'étude.

Sols		Classification taxonomique (Sous-groupe)	Classe granulométrique de la famille	Drainage
Code	Série de sols			
BS	Le Bras	Gleysol humique orthique	Loameux	Mal drainé
BV	Beaurivage	Podzol humo-ferrique gleyifié	Sableux	Imparfaitement drainé
DS	Des Saults	Gleysol orthique	Loameux-grossier	Mal drainé
NE	Neubois	Podzol humo-ferrique gleyifié	Loameux	Mal drainé
OR	Des Orignaux	Brunisol dystrique gleyifié	Loameux-grossier	Imparfaitement drainé
SE	Séraphine	Gleysol humique orthique	Sableux	Mal drainé
VA	Valère	Podzol humo-ferrique gleyifié	Sableux	Imparfaitement drainé

Source : Bossé, 2007

Les trois parcelles étudiées (CH-01, CH-02 et NF-02) occupent une superficie de 5,0, 4,0 et 6,7 ha respectivement (Tableau 9). Ainsi, on retrouve, principalement concentrée dans le champ CH-01 du côté nord-est (Figure 7), des sols de la série de Valère, appartenant au sous-groupe taxonomique des podzols humo-ferriques gleyifiés (Tableau 9). Ces sols, développés sur dépôts fluviatiles fins, sont imparfaitement drainés. Dans le champ CH-02, dans le coin inférieur gauche (sud-ouest), on observe des sols de la série Le Bras qui dominant (Figure 7). Ces sols, au drainage mauvais, développés à partir d'un dépôt fluvio-lacustre appartiennent aux gleysols humiques orthiques. Quant à la parcelle NF-02, la partie centrale est parcourue par des sols de la série Le Bras, tandis qu'aux deux extrémités du champ, on retrouve les sols des séries Valère et Le Bras (Figure 7, Tableau 9). Dans les deux premiers champs, entre les deux principales séries, on retrouve également des sols des séries de Beaurivage, de Neubois et des Orignaux (Tableau 9) appartenant respectivement à l'ordre des Podzols, pour les deux premières séries et à l'ordre des Brunisols pour la dernière. On note donc une proportion plus élevée de podzols et brunisols, dont la surface est souvent enrichie en sesquioxydes de fer et d'aluminium, de l'ouest vers l'est, soit CH-01 > CH-02 > NF-02 avec respectivement 60,7%, 46,3% et 34,7% de la superficie occupée par ces deux ordres de sols (Tableau 10). Inversement, la proportion des gleysols augmente d'est en ouest : NF-02 > CH-02 > CH-01 avec respectivement 57,7%, 53,7% et 39,3% de la superficie occupée par cet ordre de sols (Tableau 9). La texture de surface varie de loam sableux (2) à loam (3), la proportion des loam sableux diminuant d'ouest en est avec respectivement 74,0%, 62,2 et 52,2% de la superficie totale des parcelles CH-01, CH-02 et

NF-02 (Tableau 9). Le drainage varie également entre les parcelles car le drainage D6 (mal drainé) domine la parcelle NF-02 avec 72,5% de la superficie alors que le drainage D4 (modérée) domine la parcelle CH-02 et le drainage D5 (imparfait) prédomine dans le champ CH-01 (Tableau 10). Ces conditions pédologiques devraient influencer la capacité de fixation du phosphore des sols de ces parcelles.

Tableau 9 : Distribution spatiale (% de la superficie totale) des classes de sols identifiées dans les parcelles à l'étude (Bossé, 2007).

Caractéristiques	Classe	CH-01	CH-02	NF-02
Superficie	(ha)	5,4	4,0	6,7
Codes des séries de sols composant les unités de la carte pédologique très détaillée des parcelles	BS	28,9	37,5	49,3
	BV	16,3	3,8	0,00
	DS	7,0	4,7	1,2
	NE	1,6	4,2	7,1
	OR	7,6	5,4	0,0
	SE	3,5	11,4	14,96
	VA	35,2	32,9	27,5
Ordre taxonomique	Podzol	53,1	40,9	34,7
	Brunisol	7,6	5,4	0,0
	Gleysol	39,3	53,7	57,7
Texture de surface ^x	2	74,0	64,2	52,2
	3	26,0	35,8	47,8
Classification granulométrique du matériau parental ^y	S	55,0	48,1	42,4
	Lg	14,6	10,1	1,2
	L	30,4	41,8	54,4
Classification du drainage du sol ^z	D4	39,3	53,7	0,00
	D5	44,4	42,5	25,5
	D6	16,3	3,8	72,5

* Codes des sols et non-sols : BS = Le Bras; BV = Beaurivage; DS = Des Saults; NE = Neubois; OR = Des Orignaux; SE = Séraphine; VA = Valère.

^x Code de texture de surface : 2 = loam sableux; 3 = loam.

^y Code des classes granulométriques : S = sableux; Lg = loameux grossier; L = loameux.

^z Code de drainage : D4 = modérément drainé; D5 = imparfaitement drainé; D6 = mal drainé.

3.2 Méthodologie d'échantillonnage et d'analyse des sols

3.2.1 Stratégie d'échantillonnage des sols

La couche de surface (0-20 cm) de chacun des trois champs à l'étude a été échantillonnée et géoréférencée. Ces échantillons (n=164) ont été prélevés selon un dispositif d'échantillonnage systématique (Figure 8) à l'aide d'une grille non alignée de 30 m x 30 m. L'échantillonnage a été effectué au printemps 2005, juste avant l'épandage de fumier ou lisier et avant le semis. Cette stratégie correspond à une densité d'échantillonnage de 11 échantillons par ha, soit onze fois plus élevée que la norme d'un échantillon par ha généralement utilisée dans l'industrie.

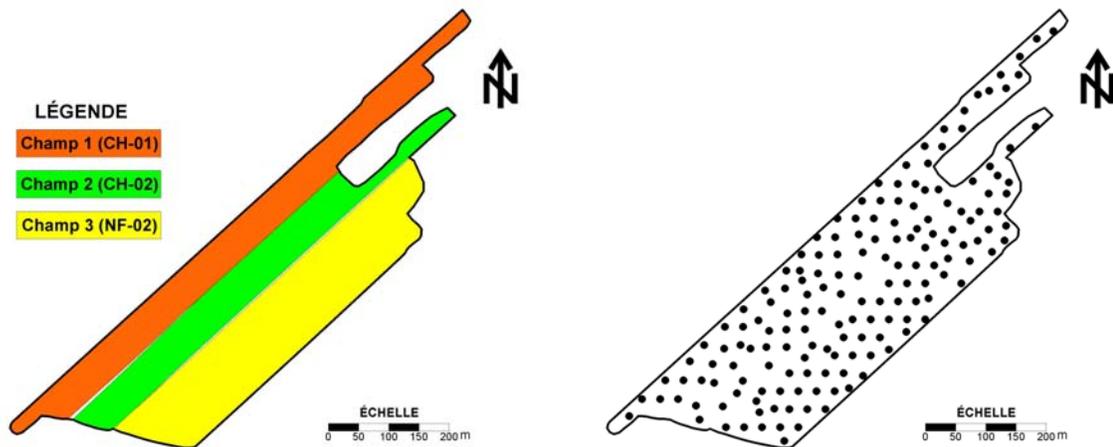


Figure 8 : Localisation des parcelles et dispositif d'échantillonnage des sols utilisé.

3.2.2 Analyses physiques et chimiques des sols

Les échantillons ont été séchés à l'air, à la température ambiante. Les sols séchés ont ensuite été broyés et tamisés à 1,7 mm. La granulométrie a été déterminée selon la méthode de l'hydromètre modifiée (Sheldrick et Wang, 1993). Les éléments nutritifs ont été déterminés par la méthode Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) dont Al (Al_{M-3}), Fe (Fe_{M-3}) et P (P_{M-3}). Ceci a permis de mesurer deux indicateurs de la capacité de fixation du phosphore, soit Al_{M-3} et $Al_{M-3} + Fe_{M-3}$. La matière organique (carbone total) a été déterminée suite à une oxydation par voie humide au bichromate de potassium en milieu sulfurique (Tiessen et Moir, 1993). Le pH a été mesuré dans l'eau (pH_{eau}) selon la méthode décrite par Hendershot *et al.* (1993) tandis que le pH tampon (pH_{SMP}) a été mesuré dans une solution tampon de Shoemaker, McLean et Pratt (SMP)

selon la procédure décrite par Tran et Van Lierop (1993). Les teneurs en oxydes de Fe (Fe_{ox}), d'Al (Al_{ox}) et le P (P_{ox}) extraits à l'oxalate acide d'ammonium ont été mesurées selon la méthode décrite par Ross et Wang (1993). Cette extraction a permis de dériver un autre indicateur de la CFP, soit $Al_{ox}+Fe_{ox}$. Le quatrième indicateur de la CFP utilisé était l'indice de sorption du phosphore (PSI), tel que mesuré selon la méthode proposée par Bache et Williams (1971).

3.2.3 Degré de saturation en phosphore

L'indice de saturation en phosphore $Psat$ proposé par Giroux *et al.* (1996) exprime le rapport du phosphore extrait au réactif Mehlich-3 (P_{M-3}) sur l'aluminium extrait avec le même réactif, soit Al_{M-3} (Tran et Simard, 1993). L'indice $Psat_{ox}$ correspond au quotient de P_{ox} sur la somme $Al_{ox}+Fe_{ox}$ (Van der Zee *et al.* 1988), soit :

$$Psat = P_{M-3}/Al_{M-3}$$

$$Psat_{ox} = P_{ox}/(Al_{ox} + Fe_{ox})$$

3.3 Mesure et cartographie des variables auxiliaires

3.3.1 Mesure de la conductivité électrique apparente

Le conductivimètre électromagnétique Geonics EM-38 (Geonics Ltd, Mississauga, On, Canada) a été utilisé pour cartographier la conductivité électrique apparente (CEA) des sols présents dans les trois parcelles à l'étude en mai 2007. Cet appareil, placé en position verticale, à 20 cm du sol, est jumelé à un carnet électronique et à un système de positionnement par satellite en mode différentiel (DGPS). Il s'agit d'une mesure de détection rapprochée (*proximal sensing*) car la mesure se prend très près du sol, sans nécessiter un contact avec celui-ci. Le EM-38 est constitué de deux sélénoïdes (émetteur/récepteur) distant de 1 m chacun. Les mesures sont prises verticalement à partir de la surface du sol jusqu'à une profondeur approximative de 1 à 1,5 m lorsque placé directement au sol (Corwin et Lesch, 2003). Chaque mesure de CEA est géoréférencée avec un récepteur GPS Pathfinder[®] Pro XR, avec une exactitude horizontale de 1 m. L'unité de mesure de la CEA est le milliSiemens par mètre (mS/m) et l'intensité du flux magnétique varie selon la CEA du sol mesurée par le récepteur entre 0 et 1,3 m (Nolin *et al.*, 2004). La mesure de la CEA a été réalisée à l'aide d'un chariot

traîné par un véhicule tout-terrain se déplaçant le long de transects parallèles à la longueur des champs et distants de 5-6 m les uns des autres (Figure 9). L'intervalle des observations (*lag*) à l'intérieur de chaque transect est de 2-3 m. Après nettoyage des données douteuses (v.g. valeurs négatives ou anormalement élevées; règle de détection : moyenne ± 2 x écart-type), les cartes de la CEA de la couche 0-130 cm de chaque parcelle ont été générées par krigeage anisotrope avec le module *Geostatistical Analyst* d'ArcGIS. La densité de prospection ainsi atteinte est d'environ 618 points de mesure par ha (n=9731 mesures).



Figure 9 : Illustration de la procédure de mesure de la conductivité électrique apparente des sols avec le Geonics EM-38 jumelé à un DGPS.

Le *VERIS 3100* (Veris Technologies, Inc. Salina, KS) a aussi été utilisé pour cartographier la CEA des sols en mai 2008 (Figure 10). Il était alors jumelé à un système de positionnement par satellite en mode différentiel. Sur cet appareil, qui a l'allure d'une herse à disques, les disques situés de part et d'autre des roues émettent et captent un courant électrique dans le sol jusqu'à une profondeur variant de 90 à 100 cm. Par contre, les disques situés entre les roues émettent et reçoivent un signal dans les 30 premiers cm du sol. Comme pour le Geonics EM-38, l'appareil servant à mesurer la CEA a été traîné par un véhicule utilitaire tout-terrain se déplaçant le long de transects parallèles à la longueur des champs et distants de 5-6 m les uns des autres (Figure 10). L'intervalle des observations (*lag*) à l'intérieur de chaque transect est de 2-3 m. Après nettoyage des données douteuses (v.g. valeurs négatives ou anormalement élevées; règle de détection : moyenne ± 2 x écart-type), les cartes de la CEA des couches 0-30 cm et 0-100 cm de chaque parcelle ont été générées par krigeage anisotrope avec le module *Geostatistical*

Analyst d'ArcGIS. La densité de prospection ainsi atteinte est de 690 points de mesure à l'ha (n=10864).



Figure 10 : Illustration de la procédure de mesure de la conductivité électrique apparente des sols avec l'appareil VERIS 3100 jumelée à un DGPS.

3.3.2 Le modèle numérique d'élévation (MNE)

Le système de positionnement par satellite RTK (*Real Time Kinematic*) Trimble 5800 est une technologie de pointe qui permet d'obtenir des mesures de phase pour des résultats précis. Il a permis la réalisation du modèle numérique d'altitude pour l'ensemble du microbassin d'intervention. La précision du RTK est du domaine centimétrique, soit de 1-2 cm en mode horizontal et de 3-5 cm en mode vertical. Le système d'acquisition comporte une unité fixe, installée à un point élevé, près du centre de l'aire à cartographier à l'intérieur d'un rayon de 2 km et d'une unité mobile, installée sur un véhicule tout terrain (Figure 11). Le relevé a été effectué à l'automne 2004 et complété au printemps 2005, le long de transects parallèles à la longueur des champs et distants de 5-10 m les uns des autres. L'intervalle des observations (*lag*) à l'intérieur de chaque transect est de 2-3 m. De plus, les fossés et cours d'eau ont fait l'objet d'un relevé effectué à pied avec l'équipement mobile chargé sur le dos.

Après nettoyage des données douteuses, le MNE du microbassin (Figure 12) a été généré par krigeage anisotrope en utilisant une partie de la base de données pour le développement du

modèle avec le module *Geostatistical Analyst* d'ArcGIS et le reste pour la validation-croisée (Ka *et al.* 2006). La densité de prospection est en moyenne de 649 points par ha (n=10227).

Quelques paramètres topographiques secondaires ont été dérivés du MNE à partir d'ArcGIS, soit la pente et l'indice d'humidité de surface (*wetness index*). Comme le rapporte Perron (2002), l'indice d'humidité de surface (ϖ) est souvent utilisé pour caractériser la distribution spatiale des zones de saturation en eau, caractéristique influençant la variabilité spatiale des propriétés du sol, soit

$$\varpi_T = \ln\left(\frac{A_s}{T \tan \beta}\right) \text{ ou } \varpi = \ln\left(\frac{As}{\tan(\beta)}\right)$$

où A_s représente l'accumulation des flux, T la transmissivité alors que β correspond à l'angle de la pente. L'indice d'humidité de surface (ϖ), tel que présenté, suppose que les propriétés du sol sont uniformes, c'est-à-dire que la transmissivité, à travers le paysage, est constante et d'unité égale [Moore *et al.*, 1991]. La valeur de cet indice augmente lorsque l'accumulation en eau est élevée et que l'inclinaison de la pente est faible. Conséquemment, les valeurs plus faibles se retrouvent dans les zones sommitales alors que les résultats élevés caractérisent les fonds de vallées.

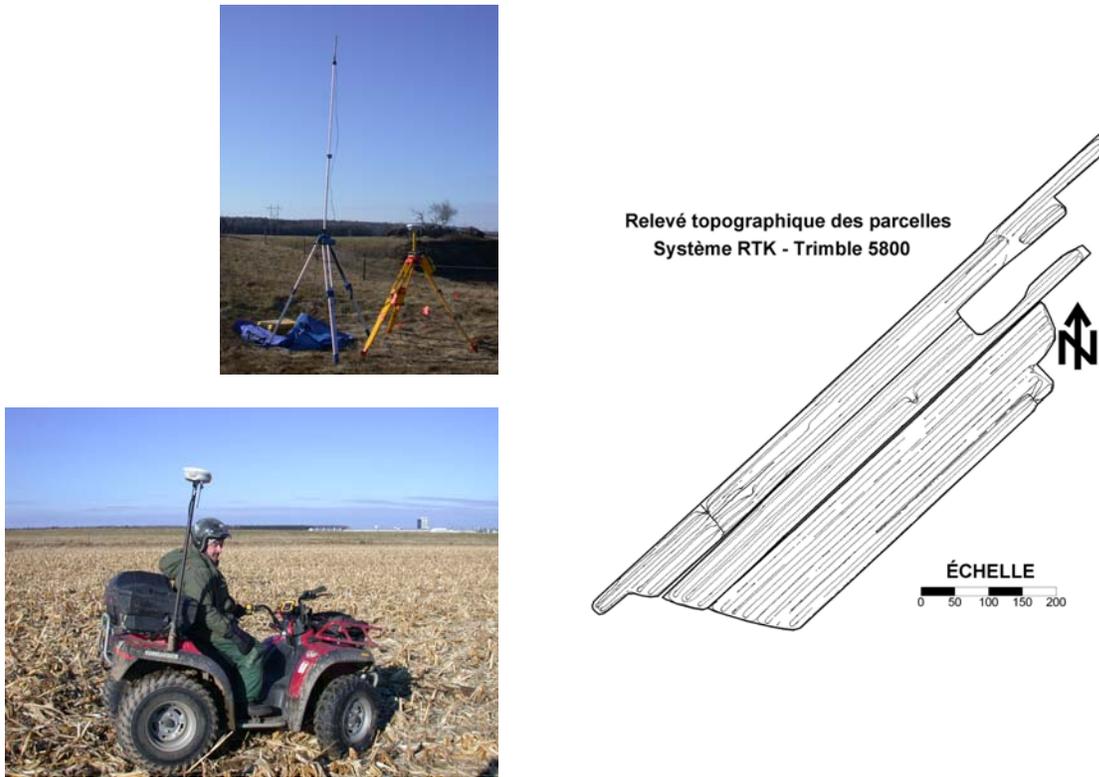


Figure 11 : Illustration de l'équipement et de la stratégie de mesure utilisés pour réaliser le relevé topographique de précision avec un système RTK Trimble 5800 : unité mobile et unité fixe.

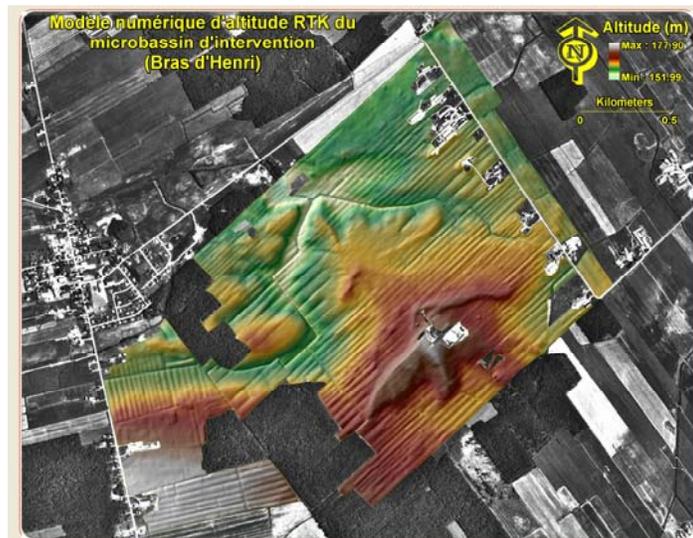


Figure 12 : Modèle numérique d'élévation réalisé dans le microbassin d'intervention du Bras d'Henri à l'aide d'un système RTK Trimble 5800. (Source : Ka *et al.*, 2006).

3.3.3 Acquisition d'images satellitaires et aéroportées

3.3.3.1 Les images ASTER

Les images ASTER (Figure 13) ont été choisies pour cette étude parce que le capteur ASTER possède deux bandes dans le visible (bandes 1 et 2 - vert et rouge) et une bande de 15 m dans le PIR (bande 3N,B) d'une résolution spatiale de 15 m x 15 m, résolution spatiale considérée minimale pour l'échelle de l'étude (échelle de la parcelle). Les six bandes dans le moyen infrarouge (30 m x 30 m) et les cinq bandes dans l'infrarouge thermique (90 m x 90 m) ne seront pas étudiées car leur résolution n'est pas suffisamment fine pour atteindre nos objectifs.



Figure 13 : Images ASTER couvrant le bassin versant du Bras d'Henri acquises le 23 juin 2000 (à gauche) et le 03 juin 2005 (à droite).

3.3.3.2 L'image IKONOS

Une image IKONOS a été acquise au-dessus du Bras d'Henri le 13 mai 2008 (Figure 14). Les caractéristiques du capteur IKONOS sont énumérées au tableau 7. Comme nous l'avons souligné précédemment, la résolution spatiale des images IKONOS est de 4 m x 4 m en mode multispectral (bleu, vert, rouge et proche infrarouge). Cette résolution spatiale correspond très bien aux objectifs de l'étude. Par ailleurs, l'utilisation d'une image IKONOS permettra d'évaluer l'impact de la résolution spatiale sur la cartographie numérique des sols en comparaison aux images ASTER.

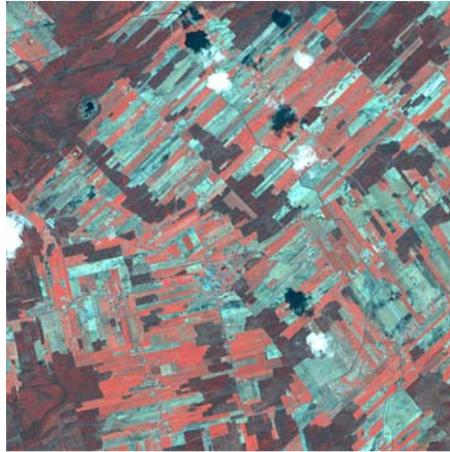


Figure 14 : Image IKONOS acquise le 13 mai 2008 au-dessus de la partie nord du bassin versant du Bras d'Henri, près des deux microbassins expérimentaux.

3.3.3.3 *Acquisition d'images multispectrales aéroportées*

Les images multispectrales aéroportées ont été acquises par un groupe de recherche appliquée de l'Institut de technologie agricole et alimentaire (ITAA) de La Pocatière entre 13h56 et 14h27 le 12 mai 2004. Lors de l'acquisition, le ciel était exempt de nuages. Une caméra numérique Ducantech MS-310 CIR munie d'une lentille Tokina 17 mm reposant sur une base Wild RC-10A fixée au plancher au centre de l'aéronef d'un bimoteur de type Cessna 310c a été utilisée. La base Wild RC-10A permet l'ajustement du niveau et de la dérive. L'angle de la caméra par rapport au sol est de 90 degrés et est ajusté en vol manuellement. Il peut arriver qu'en raison de turbulence, l'angle change quelque peu. Cependant aucun enregistrement des changements d'angle de la caméra n'est mesuré puisque l'ajustement se fait mécaniquement. L'étalonnage de l'appareil numérique est effectué selon l'appréciation visuelle de l'image du photographe qui ajuste l'exposition et le gain de l'appareil en cours de vol. Malheureusement, aucun étalonnage avec référence au sol n'a été effectué pour cette image, ce qui en limite l'utilisation par exemple, pour le calcul des indices spectraux. La caméra couvre trois bandes, soit celles du proche infrarouge (800 nm \pm 40), du rouge (650 nm \pm 35) et du vert (550 nm \pm 35). Une résolution au sol de 1 m x 1m requiert que l'aéronef se situe à une altitude de 12 000 pieds. À 1 mètre par pixel soit une altitude de 12 000 pieds chaque image couvre 1 392 m de largeur par 1 040 m de hauteur (donc une résolution de 1 392 x 1 040 pixels). Les images ont ensuite été géoréférencées et une mosaïque a été créée (Figure 15). Pour des raisons de calibration, cette image multispectrale aéroportée n'a pas subi de prétraitement.



Figure 15 : Mosaïque produite à partir des images multispectrales aéroportées acquises le 12 mai 2004 au-dessus de la partie nord du bassin versant du Bras d’Henri, près des deux microbassins expérimentaux.

3. 3.4 Prétraitement des images satellitaires

3. 3.4.1 Correction radiométrique

La correction radiométrique permet d’assurer une certaine uniformité radiométrique acceptable des images. Les images optiques sont étalonnées par le fournisseur. À la réception, ces dernières doivent subir une correction radiométrique afin de prendre en compte des paramètres qui ont un effet sur la quantité d’énergie mesurée par le capteur. Ces paramètres sont désignés sous les termes de « paramètres d’acquisition » (angle d’incidence, orientation du capteur, ...). Cependant, ces informations sont fournies sous forme de vecteur avec l’image brute et elles sont prises en compte automatiquement par le logiciel de traitement d’image (PCI Geomatics, version 9).

Les comptes numériques de l’image ont été convertis en luminance (L) puis en réflectance (ρ) pour chacune des bandes (λ) selon les formules suivantes : (1)

$$L_{\lambda} = \frac{10^4 \cdot DN_{\lambda}}{CalCoef_{\lambda} \cdot Bandwidth_{\lambda}} \quad (1)$$

où

DN_{λ} = Compte numérique

$CalCoef_{\lambda}$ = Coefficient de calibration [(mW/cm²-sr)]

$Bandwidth_{\lambda}$ = Bande spectrale utilisée inscrit λ (nm)

et selon l'équation de la réflectance apparente : (2)

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{SUN_{\lambda}} \cdot \cos \theta_s}, \quad (2)$$

où L_{λ} est la luminance de l'onde, d = la distance entre la terre et le soleil, θ = l'angle zénithal du soleil en radians et $E_{sun_{\lambda}}$ = la moyenne d'irradiance exoatmosphérique pour chaque bande du capteur IKONOS (Taylor, 2005).

Les paramètres d'acquisition et de correction radiométrique de l'image IKONOS sont présentés au tableau 10. Les coefficients de calibration pour les images ASTER sont disponibles sur le site Internet de USGS (<http://asterweb.jpl.nasa.gov>; Abrams *et al.*, 2005).

Tableau 10 : Paramètres d'acquisition et de correction radiométrique de l'image IKONOS.

Caractéristiques de l'image IKONOS	Territoire BV du Bras d'Henri
Date de la capture de l'image	2008-05-13
Heure de la capture de l'image (GMT)	15 h 51mn
Présence de brume (haze)	< 5 %
Conditions météorologiques au moment de la prise d'image	Dégagée
Conditions météorologiques de la journée	Dégagée
Élévation moyenne en mètre	45,00
Angle Zénital (en degrés)	29,70
Visibilité en Km	40,00

Source : *Compilation effectuée à partir des données d'observation de la station météorologique de Jean-Lesage d'Environnement Canada et à partir des fichiers de métadonnées satellitaires de VIASAT.*

Pour la correction atmosphérique, nous avons utilisé l'algorithme ATCOR2 de PCI qui ne tient pas compte de la topographie car le territoire d'étude étant relativement plat, la topographie n'a que très peu d'impact. L'application du module ATCOR2 a permis de corriger les effets atmosphériques (aérosols, poussières, gaz etc). Elle a aussi permis d'avoir les valeurs de réflectance utilisées dans l'étude.

3.3.4.2 Correction géométrique

L'objectif d'une correction géométrique est de pouvoir superposer les images afin de les comparer. Il convient donc d'utiliser une méthode standard de correction géométrique des produits. Ceci est particulièrement important lorsqu'on veut réaliser des études avec des images prises à plusieurs périodes (études multitemporelles) comme dans le cadre du présent projet de recherche. Ainsi, les mouvements du satellite, son système de prise de vue, l'angle de vue du capteur, la rotation de la terre et celle du satellite, et le relief sont autant de sources de distorsion des images brutes. Aussi, il faut souligner que le choix d'une méthode de correction peut dépendre des critères liés aux utilisations futures des images et des informations

disponibles sur la région étudiée. Dans le cas de notre étude, les corrections ont été réalisées par la méthode «Ortho» qui consiste à corriger directement les distorsions en tenant compte de leurs sources ou de leurs origines, c'est à dire les paramètres d'acquisition de l'image et un MNE.

Pour les corrections géométriques, nous avons utilisé la base de données topographique du Québec (BDTQ), avec un modèle numérique d'altitude (MNE) contenant l'information cartographique et topographique vectorielle de la province de Québec à l'échelle de 1 :20 000. Dans ce cas, le MNE utilisé a une résolution spatiale de 10 m et la précision altitudinale varie de 5 à 10 m. Les logiciels ArcGIS version 9. (ESRI, 2003) et PCI Geomatica (PCI Geomatics Enterprises Inc, 2003) ont été utilisés pour réaliser ces MNE. La procédure décrite dans le guide de géoreférence d'ASTER (Abrams *et al.*, 2005) a été utilisée. Les corrections géométriques de l'image IKONOS ont été effectuées avec le module OrthoEngine du logiciel de traitement d'image PCI Geomatica, version 9.

3.3.5 Calcul des indices spectraux pour l'image IKONOS

Un indice se définit comme une variable synthétique, numérique qui caractérise l'intensité ou l'extension d'un phénomène trop complexe pour être décomposé en un nombre maîtrisable de paramètres (Caloz, 1994). Sa relation est déduite par corrélation entre les mesures faites sur le terrain et celles opérées par le radiomètre du satellite. L'avantage de son utilisation est de réduire la contribution spécifique du sol pour que la sensibilité de l'indice ne concerne que la végétation. Lorsque la végétation ne couvre que partiellement le sol, le signal émis par le sol se mélange avec celui du couvert végétal.

Nous avons choisi deux indices spectraux relatifs à l'image IKONOS dans cette thèse dans le but de les utiliser comme stratificateur ou variable auxiliaire dans la segmentation en ZA et dans la réduction de la variance (RV). Le premier indice spectral, l'indice de végétation ajustée aux sols (SAVI = *soil adjusted vegetation index*) repose sur une modification de la formule de l'indice de végétation (NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*) par une différenciation des rapports respectifs des bandes rouge ® et proche infrarouge (PIR) auquel une constante L a été ajoutée pour minimiser l'effet de brillance du sol. Il s'agit de l'indice SAVI mise au point par Huete (1988). Ce dernier suggère une valeur de $L = 1$ pour une très faible densité de végétation, de $L = 0,5$ pour une végétation intermédiaire et de $L = 0,25$ pour

une végétation dense. Nous avons considéré $L=1$ dans cette étude menée au printemps sur des sols nus.

$$SAVI = \left(\frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + L} \right) * (1 + L) \quad (3)$$

où ρ_{PIR} est la réflectance dans le proche infrarouge et ρ_R est la réflectance dans le rouge. L'indice SAVI a donc été calculé à partir de la bande spectrale du PIR et de la bande spectrale du rouge de l'image IKONOS.

Le deuxième indice (SAVI* ou SAVI krigé) a été calculé à partir des bandes spectrales de l'image IKONOS comme dans le cas du SAVI. Cet indice a par la suite été généré par la méthode de krigeage simple dans une approche anisotrope dans le but d'en éliminer le bruit et son impact sur la réduction de variance (RV) lors de la stratification des parcelles (Chapitre 6).

3.3.6 Méthodologie d'extraction des valeurs de réflectance à partir de l'image IKONOS

Trois méthodes d'extraction de valeur de réflectance à partir de points dans l'image IKONOS ont été utilisées, soit au pixel (1), une moyenne de 9 pixels soit (3X3) pixels et une moyenne de 25 pixels (5X5) pixels. Il s'agit d'une méthodologie de filtrage. Ce filtrage a été réalisé à partir du «Raster calculator» du module Spatial Analyst de ArcGIS (ESRIS, 2003) et de la formule permettant le calcul de la moyenne des pixels pour une fenêtre rectangulaire de dimensions 3X3, ou 5X5. Les valeurs NODATA ne sont pas considérées dans ce type de calcul. Un exemple de ce calcul pour la bande du proche infra rouge pour une dimension de 3 X 3 est :

[PIR3x3] = Focalmean ([oIK_13052008_PIR.tif], RECTANGLE, 3, 3, NODATA) où

oIK_13052008_PIR.tif est une image ikonos (iK) orthorectifiée (o) prise le 13-5-2008 dans le domaine du proche infrarouge (PIR). [PIR3x3] est en fait la matrice à l'intérieur de laquelle les résultats du filtre 3x3 seront sauvegardés.

3.4 Analyses statistiques et spatiales des données

3.4.1 Système d'information géographique

Comme l'analyse et l'interprétation des images satellitaires dépendent des données acquises sur le terrain, un SIG a été utilisé afin de mieux gérer l'ensemble des données géographiques qui sont prises en compte. Parmi les données d'entrée, nous retrouvons entre autres, la délimitation de la zone d'étude, les renseignements sur les caractéristiques physico-chimiques des sols des parcelles à l'étude, le modèle numérique d'élévation (MNE), la classification des sols, les séries de sol, la taxonomie, le type et les pratiques agricoles, les variables auxiliaires (prospection électrique et images), en un mot la cartographie complète et récente des sols à l'étude. Toutes ces données sont intégrées dans un modèle de cartographie illustrant la distribution discrète ou la continuité spatiale de quelques indicateurs de la qualité des sols agricoles. Ces données permettront de trouver des modèles de prédiction des propriétés des sols directement par les variables choisies ou à l'aide de variables auxiliaires comme le modèle numérique d'élévation, la conductivité électrique apparente des sols et les données de télédétection.

3.4.2 Analyses statistiques

Chacune des analyses statistiques a été effectuée à l'aide du logiciel SYSTAT, version 11 (Systat Software, Inc., 2004). Dans un premier temps, nous avons effectué les statistiques descriptives des différents indicateurs à l'aide de la tendance centrale (moyenne) et l'intensité de la variation (CV). Cette analyse nous a permis d'identifier les données aberrantes, d'éliminer les valeurs extrêmes et de vérifier les conditions de normalité dans la distribution des données. Le CV nous a été utile pour comparer la variabilité de chacun des indicateurs de la CFP entre eux (Webster et Olivier, 1990). Le test de normalité (Shapiro-Wilk test) a été réalisé sur les données brutes originales car les transformations logarithmiques ($\log x$), racine carrée ($x^{0,5}$), et réciproque ($1/x$) n'ont pas amélioré la normalité. Le test de Scheffé a été effectué sur les quatre indicateurs de la CFP dans le but d'analyser les différences significatives des moyennes entre les indicateurs de la CFP.

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une analyse de corrélation entre les quatre indicateurs de la CFP et les différentes variables auxiliaires par le test de corrélation simple de Pearson. Le but de ce test est d'identifier les relations qui existent entre les indicateurs de la

CFP et les différentes variables auxiliaires choisies dans le cadre de cette recherche. Dans un troisième temps, une analyse de variance (test de Scheffé) a été exécutée sur l'ensemble des classes obtenues par la stratégie de délimitation des ZA à partir des variables auxiliaires et pour chaque stratificateur en utilisant le test de comparaison multiple de Scheffé. Ce test statistique indique s'il y a une présence d'une différence significative entre les moyennes des classes (zones) prises deux à deux pour un indicateur donné. Il permet donc de déterminer si, après une ANOVA significative révélant la présence d'au moins une moyenne significativement différentes des autres, les moyennes de deux groupes de la variable à l'étude diffèrent. Nous avons choisi ce test statistique parce qu'en plus d'être très conservateur, il ne demande pas que tous les échantillons utilisés dans l'ANOVA aient la même taille par rapport au test de Tukey qui nécessite des échantillons de même taille.

3.4.3 Analyses géostatistiques

3.4.3.1 Variographie, krigeage et co-krigeage

Dans le but d'étudier la variographie ainsi que l'évaluation de la présence de structure spatiale des indicateurs de la CFP à partir des paramètres du semi-variogramme (*i.e.* le modèle théorique, la portée (A_0), l'effet pépité (C_0), le plateau ($C_0 + C$) et le ratio $C/C_0 + C$), nous avons utilisé le module *Geostatistical Analyst* du logiciel ArcGIS, version 9.2 de l'Institut de Recherche du Système Environnemental (ESRI, 2003). D'abord, le module d'exploration des données (*Explore Data*) nous permet de voir si des tendances existent dans les données, de revoir les statistiques descriptives des indicateurs et d'étudier la normalité de leur distribution. Par la suite, le module *Geostatistical Analyst* permet de modéliser les semi-variogrammes et de faire l'interpolation spatiale par krigeage ou co-krigeage de chaque indicateur.

Dans un premier temps, les 164 points échantillonnés et géoréférencés dans les trois champs sont importés dans un fichier «*Shape*» (*Shape file*) de type «point» où ils sont ensuite projetés dans le système de projection «NAD 1983, MTM (*Modified Transverse Mercator*), Zone 7» régulièrement utilisé dans les applications géomatiques au Québec. Ce système de projection définit la position en termes de coordonnées géographiques de chaque point échantillonné dans les trois champs du bassin versant de la rivière du Bras d'Henri. L'intervalle de mesure de la semi-variance (*lag*) a été établie à 30 m correspondant à la maille de la grille d'échantillonnage utilisée (30 m x 30 m). La distance maximale considérée pour la modélisation du semi-

variogramme a été fixée à 690 m, correspondant à 23 intervalles de mesures (*lag*) et à 70% de la distance maximale entre les points de mesure (952 m). Au-delà de cette distance, le nombre de paires de points n'est pas suffisant pour estimer la valeur de la semi-variance. La largeur de tolérance de la zone de recherche des paires de points (*bandwidth*) utilisés pour bâtir le semi-variogramme a été fixé à 1 m pour un angle de tolérance de 45 degré et un angle de direction de 47,2 degré, établi à partir de l'orientation des trois champs selon l'axe le plus long. Le choix de tous ces paramètres avait pour but de faire en sorte que les paires de points considérés pour le modèle théorique (sphérique) soient mieux ajustées au modèle expérimental du variogramme. Le modèle sphérique est celui qui convenait le mieux pour cette recherche, après avoir essayé aussi d'autres modèles (gaussien, exponentiel...). La figure 16 illustre l'ajustement du modèle de semivariogramme avec le module *Spatial Analyst de ArcGIS* lorsqu'on prend l'indicateur de la CFP qu'est *AIM3*.

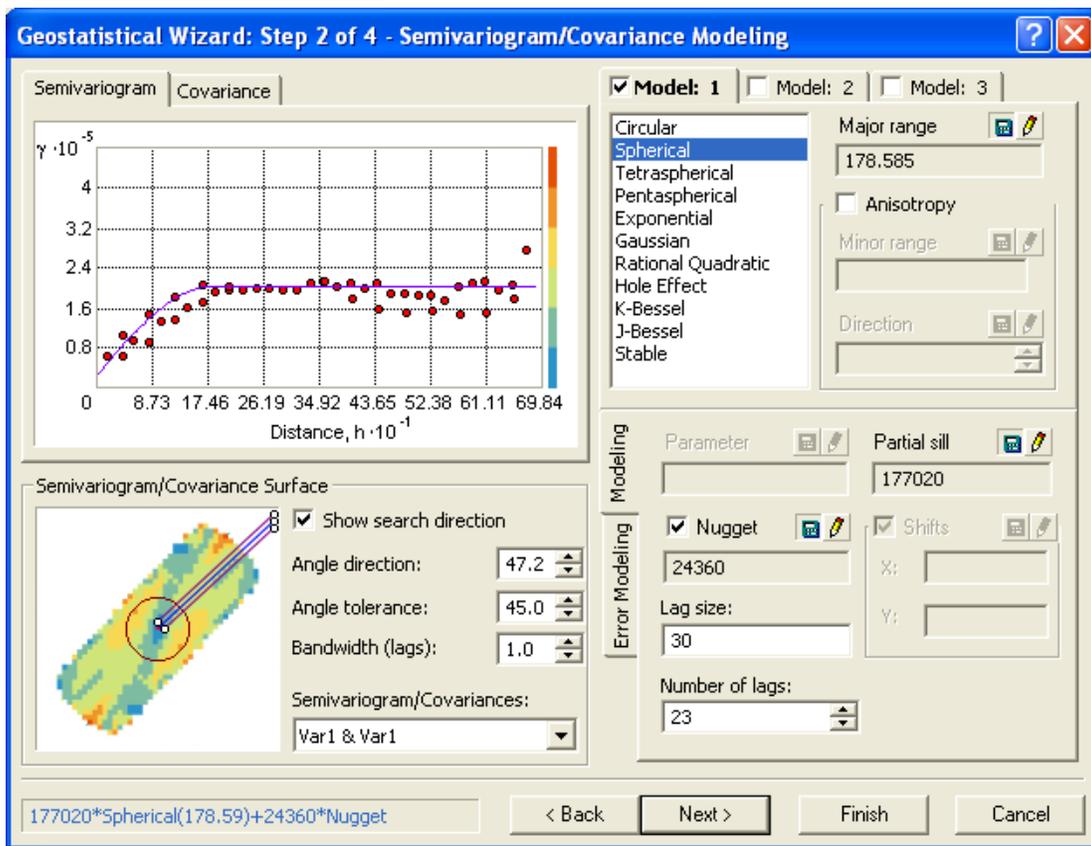


Figure 16 : Ajustement du modèle du semivariogramme avec le module *Geostatistical Analyst* (*ArcGIS*).

Dans un deuxième temps, nous avons procédé au choix des points voisins à considérer dans l'interpolation spatiale par krigeage ou co-krigeage à partir des points échantillonnés. Cette étape nous montre les coordonnées du point considéré dans le krigeage, le nombre de points voisins (15 voisins) et leur position géographique par rapport au point considéré ainsi que la valeur de la prédiction. La figure 17 illustre cette étape de prise en compte du nombre de points voisins pour l'interpolation du point mesuré.

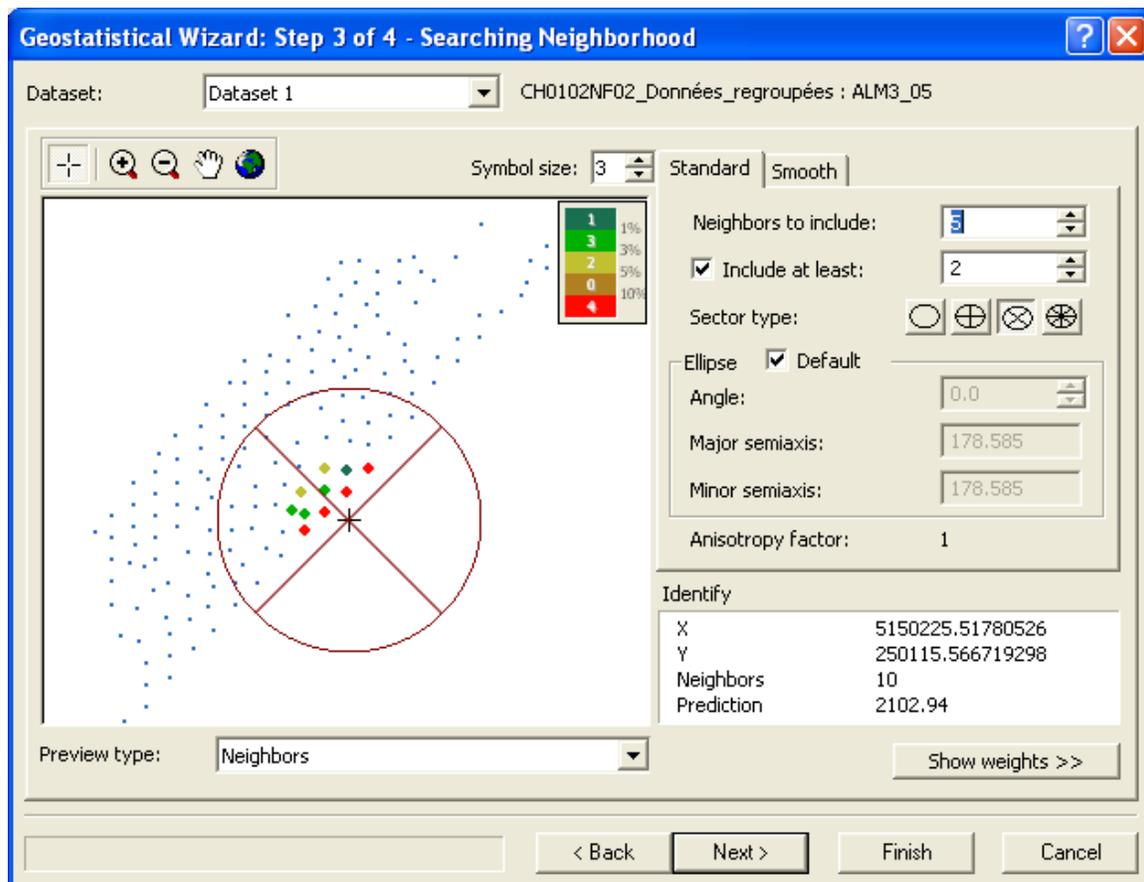


Figure 17 : Nombre de points voisins pris en compte pour l'interpolation du point mesuré.

La troisième étape est celui de la validation croisée qui nous montre un résumé des statistiques descriptives ainsi que la fonction de régression de la droite d'ajustement des points prédits par rapport au point échantillonné (point mesuré). Pour le co-krigeage (krigeage soutenue par une variable auxiliaire), le processus demeure le même. La seule différence est l'intégration de la base de données de la variable auxiliaire dans le module *Geostatistical Analyst* en même temps que celle de la variable d'intérêt. Par la suite, on observe les paramètres statistiques de la

validation croisée pour voir comment la variable auxiliaire réduit l'erreur standard d'interpolation et l'erreur quadratique moyenne (RMS). La figure 18 montre une étape de validation croisée dans le cas d'un krigeage simple de l'indicateur AIM3.

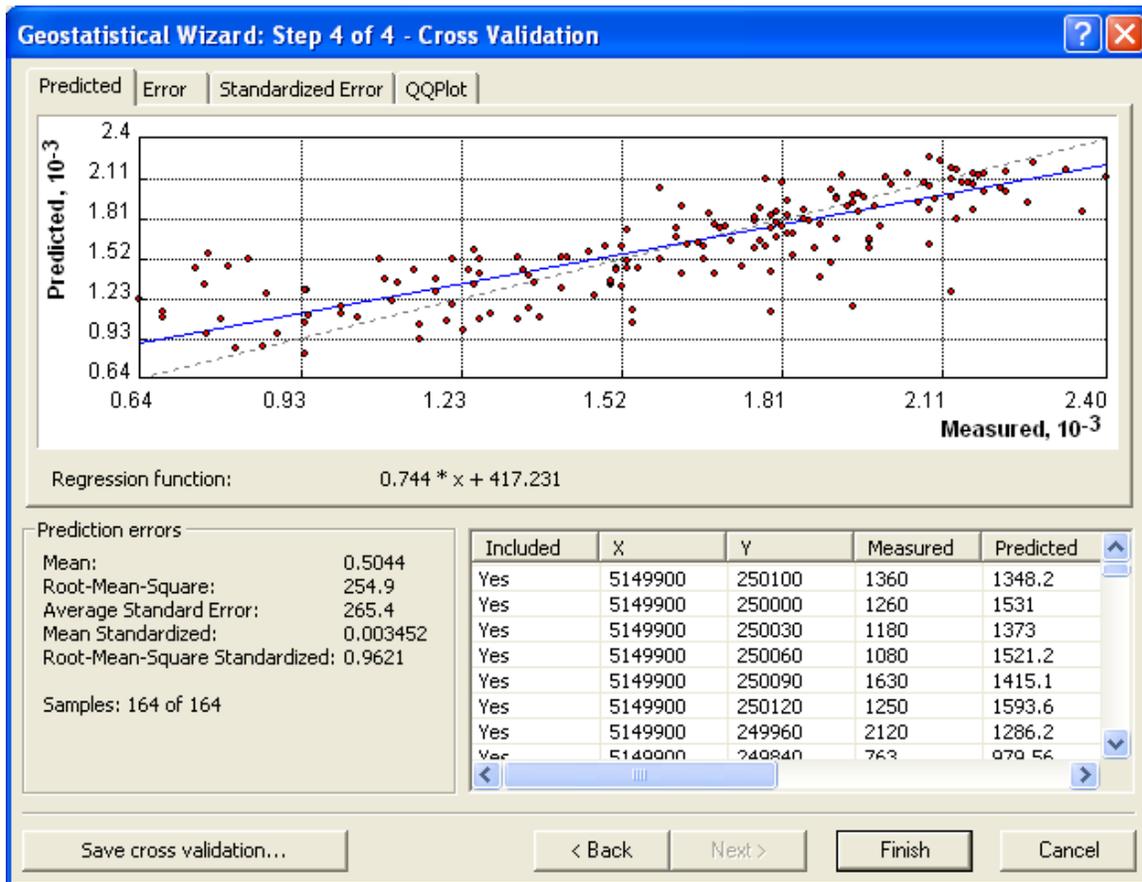


Figure 18 : Étape de validation croisée.

3.4.3.4 La validation-croisée

Avant de cartographier une surface donnée ou un phénomène par interpolation, il est important d'avoir une idée de la façon dont un modèle prédit les valeurs aux points inconnus. La validation croisée permet de bien choisir le modèle susceptible de faire les meilleures prédictions. Elle utilise toutes les données pour évaluer le modèle en enlevant les points mesurés un par un et prédisant la valeur associée à chaque point avec le reste du jeu de données. Cette méthode est communément appelée «*Jackknife*» en statistique. On peut grâce à cette procédure évaluer la qualité de l'interpolation et le bon choix des critères retenus.

Le module «*Geostatistical Analyst*» de ArcGis (ESRI, 2003) génère des outils d'analyse (graphiques et des paramètres statistiques) à partir d'un ensemble de données et permet de comparer la similarité des valeurs prédites par rapport aux valeurs mesurées. L'avantage de ce module est qu'il permet une validation du protocole choisi (par exemple le choix du modèle théorique de semi-variogramme, le choix de l'intervalle de mesure (*lag*), le choix du nombre de voisins, etc.) et laisse à l'utilisateur la décision finale du modèle et de la démarche à utiliser. Ce module décrit le rapport entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites à l'aide de graphiques et de paramètres. Les valeurs dispersées autour d'une droite théorique de pente 1:1, ligne noire en pointillé située sous une ligne bleue, en trait plein, exprimant la régression linéaire entre les données mesurées et les données prédites. La valeur de la pente est généralement en dessous de 1. Il s'agit d'une propriété du krigeage ou de l'interpolation qui a tendance à «sous estimer» les grandes valeurs et à «surestimer» les petites valeurs. L'équation de la courbe bleue qui décrit la régression linéaire est située en dessous du graphe.

La validation croisée utilisée dans le module *Geostatistical Analyst* d'ArcGIS est basée sur quatre courbes différentes. La première courbe est celle de la courbe des prédictions. Elle est la même que celle des erreurs (la deuxième). La troisième courbe est celle des erreurs standardisées issues de la soustraction des valeurs mesurées et des valeurs prédites. Les valeurs ainsi obtenues sont ensuite divisées par les erreurs standards de l'interpolation (ESM) ou l'erreur standard de prédiction. Si toutes les données sont indépendantes les unes des autres, c'est-à-dire s'il n'y a aucune autocorrélation, alors la valeur prédite est la moyenne des valeurs mesurées et la ligne bleue prend une position horizontale. Autrement dit, s'il y a une autocorrélation dans les données (*i.e.* si les données ne sont pas indépendantes les unes des autres), la ligne bleue est plus proche du rapport 1:1 c'est-à-dire proche de la ligne noire en pointillé. La quatrième courbe est la courbe appelée QQplot. Le but de cette courbe est de montrer la différence entre les valeurs quantiles prédites et les valeurs mesurées par rapport à l'erreur standard évaluée par l'interpolation et la valeur quantile d'une distribution normale standardisée. Lorsqu'une erreur de prédiction provenant de valeurs mesurées est normalement distribuée, alors les points sont distribués le long de la ligne noire en pointillée. Si les erreurs sont normalement distribuées comme il vient d'être souligné, l'on peut se fier sur la méthode d'interpolation choisie qui incorpore automatiquement la normalité à l'intérieure de la méthode d'interpolation (par exemple le krigeage). En somme, les trois premières courbes permettent de

voir comment le krigeage ou le co-krigeage permettent de réaliser des prédictions efficaces ou non. Ainsi, les statistiques et les graphiques présentées dans ce module d'analyse spatiale consistent à comparer la valeur prédite à la valeur réelle pour la validation croisée.

Considérons $Z(s_i)$ comme la valeur prédite de la validation croisée, $Z(s_i)$ comme la valeur observée et $\hat{\sigma}(s_i)$ la valeur de l'erreur standard de prédiction pour le point (s_i) , alors il est possible de définir les statistiques sommaires utilisées dans le module *Geostatistical Analyst* pour évaluer la qualité de l'interpolation spatiale et présentées dans les lignes ci-dessous. Cette évaluation repose sur trois règles fondamentales en analyse géostatistique :

1. La prédiction doit être non biaisée, *i.e.* centrée sur les valeurs mesurées. Lorsque tel est le cas, alors, l'erreur de prédiction moyenne (*Mean prediction error*) tend vers zéro, soit :

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i))}{n} = \text{erreur moyenne de prédiction} \quad (4)$$

Cependant, il est à noter que cette valeur dépend de l'échelle des données. Dans le but de standardiser cette valeur, l'erreur de prédiction au point S_i est divisée par l'erreur standard de prédiction qui lui est associée. Ainsi, EMS, l'erreur moyenne standardisée (*Mean standardized prediction error*) doit tendre vers zéro, soit EMS :

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i)) / \hat{\sigma}(s_i)}{n} = \text{erreur moyenne standardisée de prédiction} \quad (5)$$

2. Les valeurs prédites doivent être situées le plus près possible des valeurs mesurées. RMS, l'erreur quadratique moyenne de prédiction, doit être la plus faible possible. Lorsque les valeurs prédites tendent vers les valeurs mesurées, l'erreur quadratique moyenne, communément appelée «*Root-mean-square prediction error*» d'où l'acronyme RMS, prend une petite valeur.
3. L'estimation de l'incertitude liée à l'interpolation doit être valide. Ainsi, en plus de l'estimation d'une propriété en un point s_i , les algorithmes d'interpolation par krigeage génèrent aussi une mesure de la variabilité de l'interpolation (erreur standard

de prédiction). Il est important d'avoir une bonne estimation de cette mesure de variabilité. Pour cela, il faut que ESM, l'erreur standard moyenne d'interpolation (*Average kriging standard error*) soit près de la valeur de RMS. Alors, on juge que la variabilité a été correctement évaluée lors de l'interpolation, soit ESM :

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \hat{\sigma}(s_i)}{n}} = \text{erreur standard moyenne d'interpolation} \quad (6)$$

Voici quelques cas de validation croisée qui peuvent se présenter et les interprétations que l'on doit en faire :

- Si ESM est plus grand que RMS, alors il y a eu une surestimation de la variabilité de la prédiction.
- Si ESM est plus petit que RMS, alors, on a sous-estimé la variabilité de la prédiction.
- Une autre façon de procéder est de diviser chaque erreur de prédiction par sa propre erreur standard de prédiction (ESM). Ces deux erreurs devraient être semblables en moyenne. Ainsi, l'erreur quadratique moyenne standardisée (EQMS) de l'anglais « *Root-mean-square standardized prediction error* » doit tendre vers la valeur 1 si et seulement si l'erreur standardisée de prédiction est valide. Ainsi, si EQMS est de beaucoup supérieur à 1, alors la variabilité de la prédiction est sous-estimée alors que, si EQMS est fortement inférieur à 1, alors la variabilité de la prédiction est surestimée, soit EQMS :

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i))^2}{n}} = \text{Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne} \quad (7)$$

3.4.4 Évaluation de l'efficacité de la stratégie d'échantillonnage des sols

Dans cette étude, afin d'évaluer l'efficacité de la stratégie d'échantillonnage des sols, nous avons établi une stratégie de sélection des échantillons basée sur l'ensemble des échantillons des trois champs agricoles soit un total de 164 points échantillonnées. Une stratégie de sous-échantillonnage consistait à réduire progressivement la taille (n) de l'échantillon en pourcentage

de l'échantillon total pour atteindre différentes densités d'échantillonnage. Par exemple, à partir d'une taille de 164 échantillons, on a une densité (nombre d'échantillon par hectare) de 10,4 pour 100 % de la grille initiale d'échantillonnage. Pour une taille de 123 échantillons, on a une densité de 7,8 échantillons par hectare pour 75 % de la grille d'échantillonnage et ainsi de suite. Mise à part le 100% de la grille d'échantillonnage (n= 164), trois piges ont été réalisées pour chaque pourcentage d'échantillonnage et les tests statistiques ont été réalisés sur chaque pige afin d'évaluer la moyenne et l'écart type de l'ensemble des piges La figure 19 illustre cette stratégie d'échantillonnage.

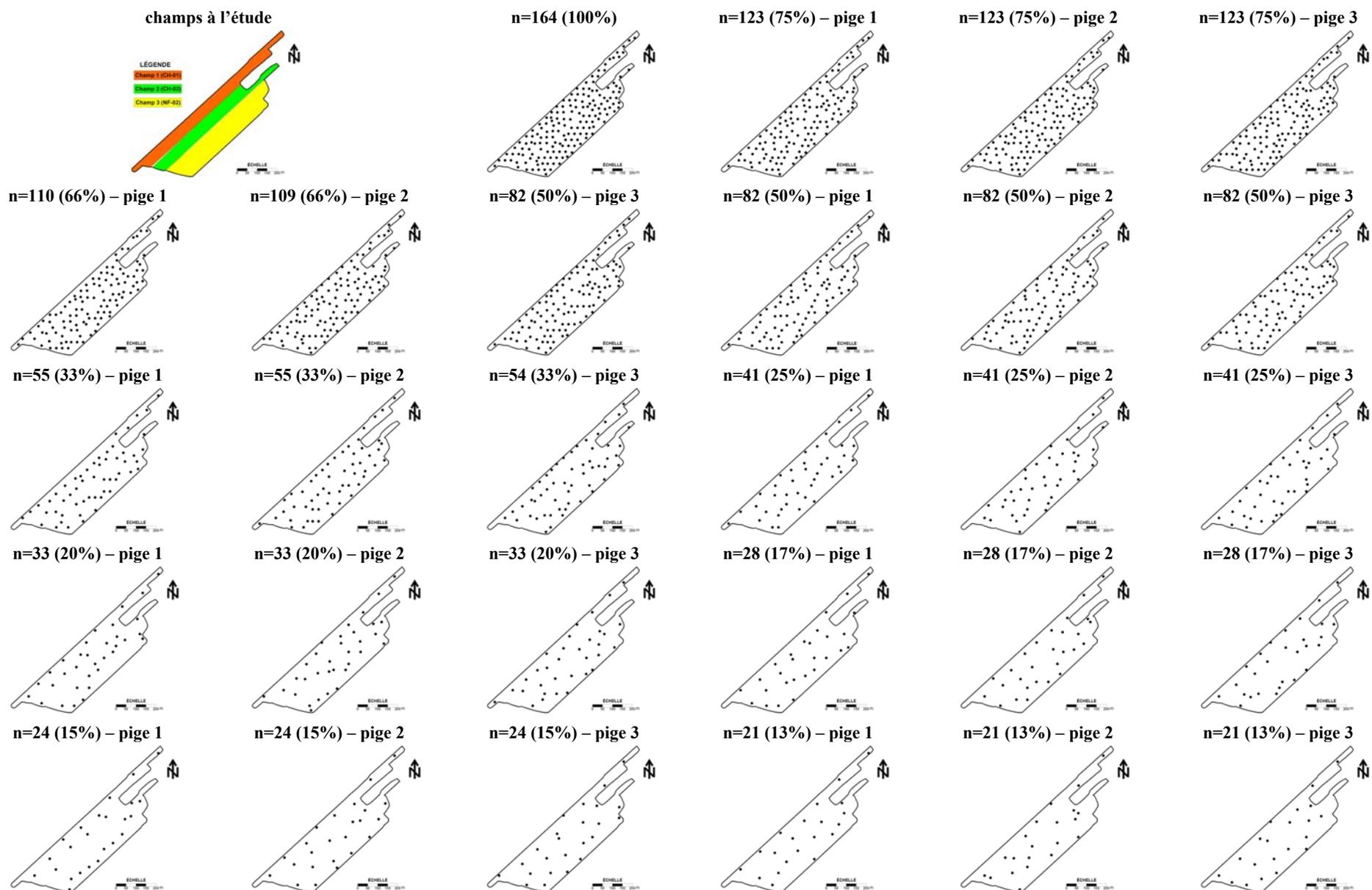


Figure 19 : Répartition des points d'échantillonnage à l'intérieur des trois champs à l'étude selon différentes densités (n) et stratégies (échantillonnage systématique par grille non alignée) de sélection.

3.4.5 Méthodologie utilisée pour évaluer l'efficacité de la stratification des parcelles en zones d'aménagement

Le logiciel MZA (Fridgen *et al.*, 2004) de l'anglais «*Management Zone Analyst*» a été utilisé dans cette étude pour définir et délimiter les zones d'aménagement à l'intérieur des trois parcelles combinées, à partir des variables auxiliaires. Ce logiciel a été développé en utilisant un algorithme de classification floue non supervisée (*Fuzzy c-means*) qui attribue aux sols composant chaque cellule élémentaire ou pixel d'un champ (ici 5 m x 5 m) une classe appropriée ou une zone d'aménagement potentielle. Le logiciel MZA a été développé par une équipe de chercheurs de l'université de Missouri, E-U. (Fridgen *et al.*, 2004), à partir de Microsoft Visual Basic 6.0 et est utilisable sur tout ordinateur possédant Microsoft Windows (95 ou plus récente) L'avantage de MZA, par rapport aux autres logiciels conçus à cette fin, est qu'il est simple d'utilisation et offre plusieurs sorties pour diverses classes ou groupes de propriétés de sorte que l'utilisateur peut évaluer directement dans le logiciel le nombre de zones d'aménagement ou d'unités de gestion qui doit être utilisé. Ainsi, le logiciel MZA effectue les statistiques descriptives et ainsi qu'une classification de type *Fuzzy C-means* non supervisée en plusieurs classes. De plus, MZA fournit à son utilisateur deux indices, soit l'indice de performance floue (IPF) et l'entropie de classification normalisée (NCE), dont le but est d'aider l'utilisateur dans le processus de détermination du nombre de classes ou de zones le plus approprié pour la création d'éventuelles unités d'aménagement dans une parcelle ou un groupe de parcelles données.

Soit la matrice U contenant les éléments de valeur de chaque classe et pour chaque observation délimitée par les contraintes pour tous les $i = 1$ à c (c étant la classe ou la partition) et tous les $k = 1$ à n (n étant le nombre de classe) où :

$$U_{ik} \in 0 - 1, \forall i, k \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^c U_{ik} = 1, \forall k \quad (8)$$

$$FPI = 1 - \frac{c}{(c-1)} \left[1 - \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (U_{ik})^2 / n \right] \quad (9)$$

Bezdek (1981) a eu à décrire la mesure de validation de groupement connu sous le nom d'entropie de classification normalisée. Le NCE modélise la désorganisation de la partition –c floue (Odeh *et al.*, 1992, lark et Stafford, 1997). L'entropie de classification (H) est définie par la fonction :

$$H(U; c) = - \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c U_{ik} \log_a (U_{ik}) / n \quad (10)$$

où :

U est définie comme l'entropie de la matrice de classification et dont la valeur est comprise entre 0 et $\log_a(c)$ et c la classe.

Bezdeck (1981) rapporte que les éléments de la fonction H ne sont pas toujours représentés avec précision dans la désorganisation totale lorsque $c = 1$, $H = 0$; lorsque $c = n$, et $H = 0$. Pour remédier à ce problème, il suggère que NCE:

$$NCE = H(U;c) / [1 - (c/n)] \quad (11)$$

Les valeurs de NCE seront similaires à celles de H quand c est relativement faible par rapport à n, c'est-à-dire (c/n) tend vers 0. Toutefois, dans des situations où (c / n) est grand (tend vers 1), NCE donnera des résultats sensiblement différents.

Ainsi, nous avons importé le fichier de données dans le logiciel MZA et sélectionné les variables d'intérêts (par exemple, AIM-3, élévation, réflectance de la bande du PIR de l'image IKONOS) pour la classification. MZA a calculé par la suite les statistiques descriptives des variables choisies. Pour les trois champs, toutes les variables de classification choisies présentaient une inégalité de variance ainsi qu'une covariance non nulle, c'est à dire que nous obtenons, pour chaque stratificateur et indicateur de la CFP étudié, une matrice de variance covariance différente de zéro. Par conséquent, la distance de Mahalanobis a été choisie comme mesure de similarité (deux autres méthodes étaient disponibles) pour la procédure de délimitation des zones. Les autres options retenues étaient l'exposant de flou (*fuzziness exponent*) qui a été maintenu à 1.5, le nombre maximum d'itération choisi à 300 et le critère de convergence fixé à 0,0001 comme suggéré par les auteurs pour obtenir le maximum

d'efficacité. Le nombre minimum de zone été fixé à 2 et le maximum à 6. Après le processus de classification, les résultats sont sauvegardés par le logiciel MZA dans un nouveau fichier de texte (Figure 20). Ce fichier de sortie demeure le même que le fichier d'entrée mais avec des colonnes supplémentaires indiquant la classification de chaque pixel dans dans une zone spécifique d'un système comprenant de 2 à 6 zones (indiqué par des étiquettes d'entête intitulées V2, V3, V4, V5 et V6). Les résultats de cette classification ont été importés dans un logiciel de cartographie (Surfer et /ou ArcGIS) pour créer des zones d'aménagement.

	IKONOS_B4	EM38	SAVI	V2	V3	V4	V5	V6
1	28.100	2.047	0.770	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
2	28.100	2.952	0.797	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
3	26.600	3.026	0.823	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
4	26.800	3.221	0.844	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
5	27.500	2.996	0.821	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
6	27.400	2.309	0.854	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
7	32.400	0.894	0.806	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
8	27.900	1.621	0.819	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
9	27.500	2.754	0.800	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
10	27.200	3.260	0.834	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
11	26.700	3.450	0.819	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000
12	26.900	2.874	0.832	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000

Figure 20 : Exemple de fichier de sortie du logiciel MZA illustrant le nombre de zones délimitées et la classification spécifique de chaque pixel du champ étudié.

L'étape finale de MZA est une étape de représentation graphique de l'indice de performance flou (IFP) qui est une mesure du degré de séparation flou (*fuzziness*) entre le nombre de partitions et la matrice de donnée (Odeh *et al.*, 1992, Boydell et McBratney, 1999). L'indice IFP est compris entre 0 et 1. Un autre indice appelé « Entropie de Classification normalisée (NCE) a été défini par Bezdek (1981). Cet indice est calculé lors de la représentation graphique et mesure la validité de la classification. La valeur de l'indice NCE est aussi comprise entre 0 et 1. Le nombre optimal de zones est atteint lorsque l'indice calculé est au minimum (valeur de l'indice comprise entre 0 et 1) illustrant ainsi la classification (IFP) ou une plus grande quantité et qualité d'organisation de l'espace en plusieurs zones (NCE). En d'autres termes, on obtient une

meilleure classification lorsque l'indice IFP est au minimum et que l'indice NCE est au maximum pour un nombre minimum de zones.

Le diagramme présenté à la figure 21 montre comment l'information circule dans le logiciel MZA et résume les concepts, la théorie de MZA et les différentes étapes de la procédure de délimitation des zones d'aménagement.

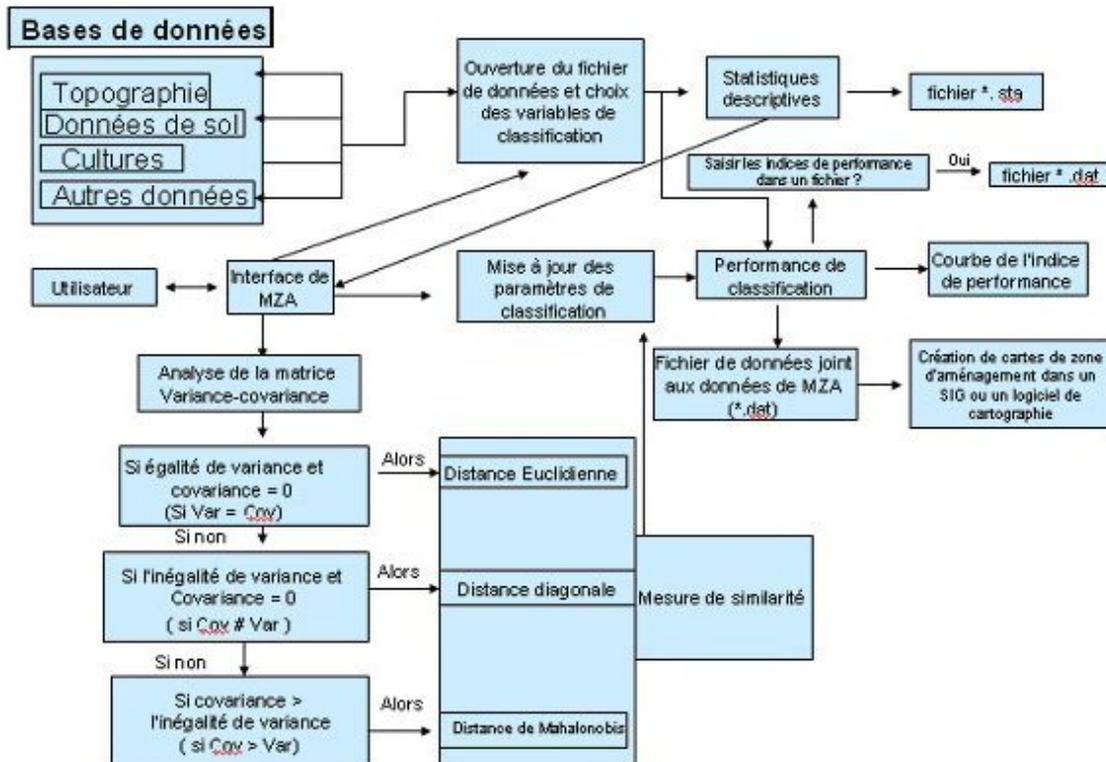


Figure 21 : Diagramme illustrant la procédure de traitement et d'analyse de l'information (variables auxiliaires) et de délimitation des zones d'aménagement dans le logiciel MZA (Adapté de Fridgen *et al.*, 2004).

Dans la présente étude, la distance de Mahalanobis a été utilisée comme mesure de similarité des pixels dans le processus de segmentation des parcelles car les analyses statistiques générées par MZA ont démontré que la matrice de variance-covariance est toujours différente de zéro. En effet pour chaque classification nous avons toujours un minimum de deux variables sélectionnées dans le module de mesure de similarité du logiciel MZA (par exemple l'élévation qui est le paramètre du MNE et de VERIS 3100 qui est le stratificateur).

3.5 Schéma récapitulatif de la méthodologie de recherche

Afin d'atteindre nos objectifs de recherche, nous avons développé le protocole méthodologique présenté à la figure 22. Ce diagramme propose deux types de cartographie de la CFP, soit 1) une cartographie de la continuité spatiale des indicateurs de la CFP suite à un échantillonnage systématique intensif des sols par grille et d'une interpolation spatiale par krigeage (approche directe) ou par co-krigeage à partir de variables auxiliaires (approche indirecte) et 2) une cartographie des indicateurs de la CFP par zones d'aménagement suite à une stratification des parcelles à l'aide de variables auxiliaires (approche indirecte). L'approche indirecte s'appuie sur des variables auxiliaires qui appartiennent à deux catégories : les senseurs au sol (CEA et MNE) et la télédétection (images satellitaires et aéroportées). L'efficacité de la cartographie de la continuité spatiale est évaluée par la précision de l'interpolation spatiale des indicateurs de la CFP par krigeage et co-krigeage tel que mesurée à partir de l'erreur d'interpolation. D'autre part, l'efficacité de la cartographie de la CFP par zones d'aménagement est évaluée par la précision de la stratification des parcelles en termes de réduction de la variance des indicateurs suite à la stratification. L'accent sera mis sur cette dernière approche car, elle constitue la toile de fond de l'innovation technologique qu'apporte notre projet de recherche dans la gestion des propriétés de sols liées à la CFP ouvrant ainsi une nouvelle voie de la maîtrise et de la gestion du P dans l'environnement agricole.

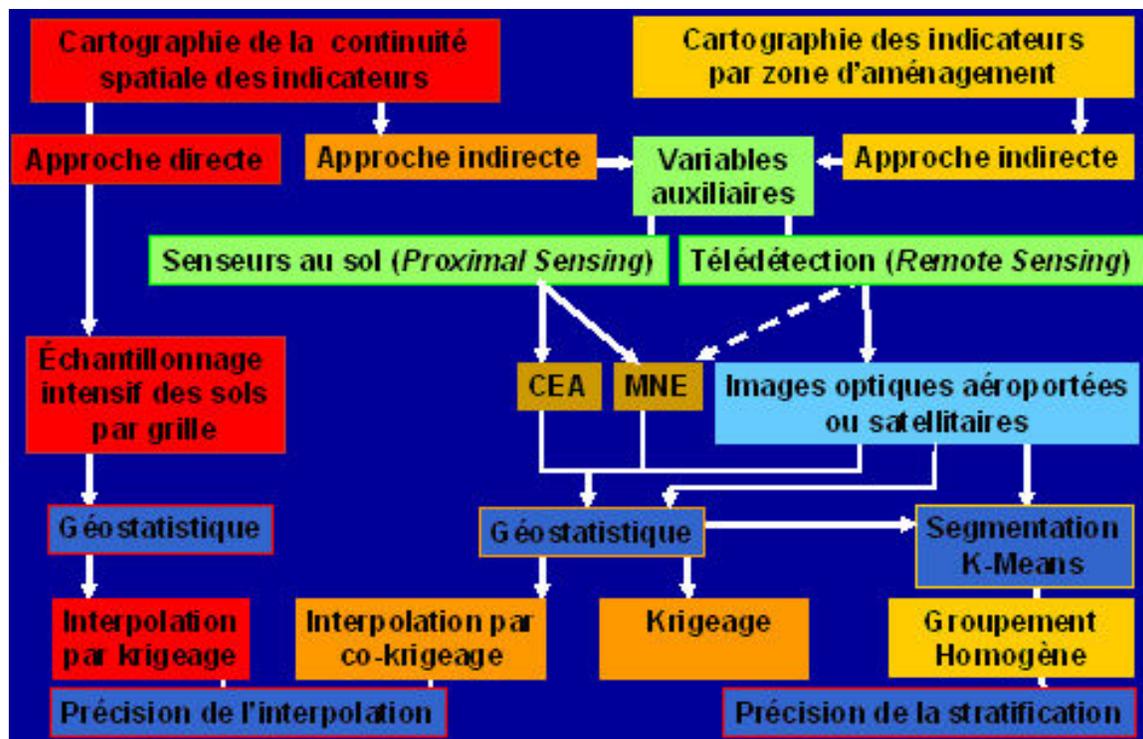


Figure 22 : Schéma synoptique de la méthodologie de cartographie des indicateurs de la CFP.

4. DESCRIPTION DE LA VARIABILITÉ SPATIALE INTER ET INTRA PARCELLAIRE DE LA CAPACITÉ DE FIXATION DU PHOSPHORE DES SOLS

La capacité de fixation du P (CFP), propriété étroitement liée à la genèse et à la texture des sols, présente souvent une structure spatiale à l'échelle du bassin versant. L'objectif du présent chapitre est d'évaluer la présence de structure spatiale des indicateurs de la CFP à l'échelle de la parcelle. Plus spécifiquement, il doit adresser la question suivante : les indicateurs AIM-3, AIM-3+FeM-3, Alox+Feox et PSI de la CFP présentent-ils une structure spatiale à l'échelle de la parcelle agricole? Les paramètres de semi-variogramme tel que le ratio, la taille de la structure (portée), la présence d'anisotropie dans la structure, permettront de répondre à cette question. Nous aborderons aussi le fait que si de telles structures existent, sont-elles suffisamment précises et fiables pour guider la gestion spécifique et précise (application modulée en mode continu) du P à l'intérieur des parcelles? Une autre question à répondre est : « Parmi les quatre indicateurs de la CFP à l'étude, lequel ou lesquels présentent les structures spatiales les mieux définies ainsi que les interpolations spatiales les plus précises et les plus fiables ? Pour y répondre, nous ferons l'évaluation de la précision et de la fiabilité de la prédiction dans le cas d'une interpolation simple (krigeage) et dans le cas d'une interpolation soutenue par des variables auxiliaires (cokrigeage) par la comparaison de l'erreur associée à ces deux types d'interpolation.

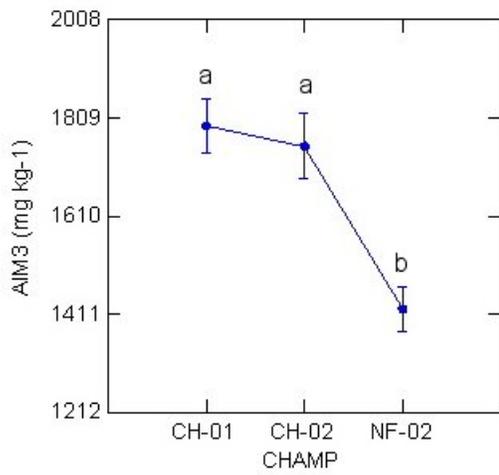
4.1 Comparaison des variables et champs étudiés à partir de quelques paramètres statistiques classiques (test de normalité, moyenne et du coefficient de variation)

Le test de Shapiro-Wilk est conçu spécialement pour étudier la normalité d'une distribution (test non paramétrique). Il est référencé dans les outils statistiques pour la qualité des données. Ce test de normalité est basé sur la comparaison à 1 de W_0 , coefficient de détermination entre les valeurs x_i d'un échantillon et des coefficients centrés réduits a_i : si W_0 est suffisamment proche de 1, on accepte l'hypothèse selon laquelle l'échantillon est issu d'une population normale, W_0 étant compris entre 0 et 1 et le niveau de signification étant fixé à 0,001. Ce test a été réalisé sur les données des quatre indicateurs de CFP, sur chacun des champs individuellement et sur

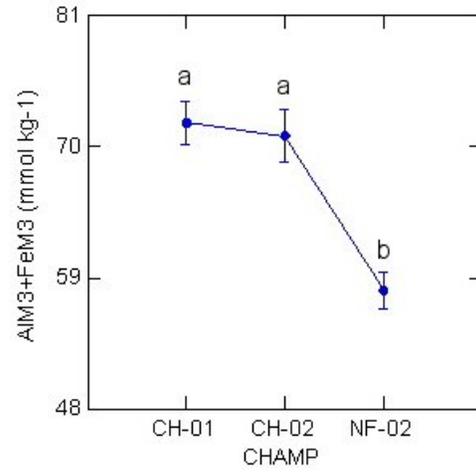
l'ensemble des trois champs présentant des tailles d'échantillons (n) relativement faibles, soit $n_1 = 55$ pour le champ 1, $n_2 = 36$ pour le champ 2 et $n_3 = 73$ pour le champ 3.

Dans le champ 1, le champ 2 et le champ 3 et dans l'ensemble des 3 champs pris ensemble, certaines données des indicateurs de CFP ne sont pas distribuées selon la loi normale. Il s'agit de Al_{M-3} dans le champ 1, de $Al_{M-3} + Fe_{M-3}$ et du PSI dans le champ 2, de PSI dans le champ 3 et enfin de Al_{M-3} et $Alox + Feox$ dans l'ensemble des trois champs. Les différentes transformations de données originales proposées pour que les distributions prennent une allure normale (Webster, 1979) ont été vaines. Il s'agit de la transformation logarithmique ($(\log(x))$), de la transformation racine carrée ($x^{0.5}$), et de la transformation réciproque ($1/x$). Fort de ce constat, les tests statistiques ont été réalisés sur les données brutes originales dans chacun des champs et dans l'ensemble des trois champs. Ces tests présentent une certaine robustesse à l'anormalité mais il faudra en tenir compte dans l'interprétation car les différentes transformations n'ont pas normalisés la distribution des données. Les paramètres statistiques utilisés pour décrire la tendance centrale (moyenne) et l'intensité de la variation ($CV =$ coefficient de variation) peuvent être utilisés pour décrire et comparer les champs étudiés. Le tableau 11 présente à cet effet les paramètres décrivant les champs et les variables à l'étude. Le test de comparaison multiple de la différence des moyennes (test de Scheffé) pour l'ensemble des trois champs montre que même si les champs sont contigus et, comme le sont la plus part des champs agricoles au Québec, longs et étroits, ils présentent des différences significatives de moyennes pour quelques propriétés.

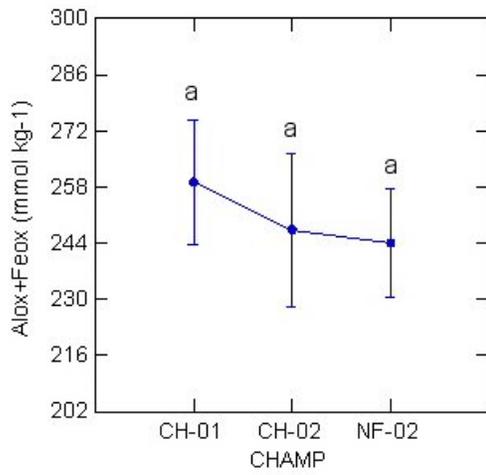
a) Al_{M-3}



b) $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$



c) $Al_{ox}+Fe_{ox}$



d) PSI

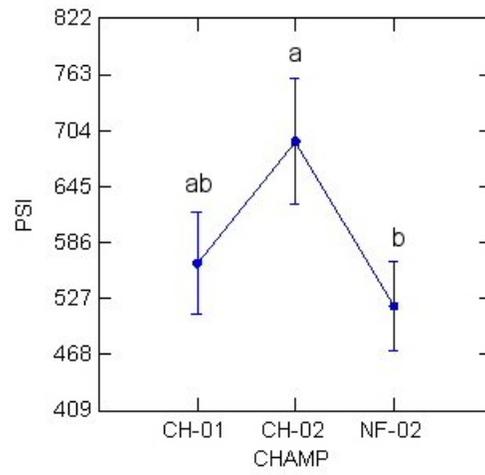


Figure 23 : Comparaison des trois champs à l'étude selon le test de Scheffé effectué sur les indicateurs de la CFP.

Ainsi, pour Al_{M-3} , on obtient une moyenne de 1793 mg kg^{-1} pour le champ 1, de 1752 mg kg^{-1} pour le champ 2 et de 1421 mg kg^{-1} pour le champ 3. Pour $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$, la valeur moyenne est de 72 mmol kg^{-1} pour le champ 1, de 71 mmol kg^{-1} pour le champ 2 et de 58 mmol kg^{-1} pour le champ 3. Les champs 1 et 2 sont semblables en moyenne mais diffèrent significativement du champ 3. Pour $Al_{ox}+Fe_{ox}$, les trois champs ne sont pas différents en moyenne, soit une moyenne de 259 mmol kg^{-1} pour le champ 1, de 247 mmol kg^{-1} pour le champ 2 et de 244 mmol kg^{-1} pour le champ 3. Quant à l'indice de sorption de phosphore, sa moyenne pour le champ 1 est de 564, de 693 pour le champ 2 et de 519 pour le champ 3. Seul les champs 2 et 3 sont significativement différents (Figure 23). Il y a donc un effet «champ» sur les indicateurs qui ressort de cette comparaison, mais la différence observée entre les champs de la variation de la capacité de fixation de phosphore peut aussi être due aux caractéristiques pédologiques de chaque champ.

Tableau 11 : Paramètres statistiques décrivant les champs et les variables à l'étude.

Variables		Moyenne	Coefficient de variation		Test de Shapiro- Wilks	
Code	Unité		CV (%)	Classe	Niveau de signification	Valeur Wo
Champ 1 (n=55)						
AlM3	mg kg ⁻¹	1793	24	Modérée	0	0.88
AlM3+FeM3	mmol kg ⁻¹	72	20	Modérée	0.001	0.9
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	259	42	Élevée	0.027	0.95
PSI	---	564	50	Élevée	0.072	0.96
Champ 2 (n=36)						
AlM3	mg kg ⁻¹	1752	26	Modérée	0.001	0.88
AlM3+FeM3	mmol kg ⁻¹	71	21	Modérée	0	0.87
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	247	48	Élevée	0.195	0.96
PSI	---	693	101	Extrêmement élevée	0	0.55
Champ 3 (n=73)						
AlM3	mg kg ⁻¹	1421	24	Modérée	0.002	0.94
AlM3 + FeM3	mmol kg ⁻¹	58	20	Modérée	0.001	0.93
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	244	48	Élevée	0.006	0.95
PSI	---	519	48	Élevée	0	0.92
Champs 1, 2 et 3 (n=164)						
AlM3	mg kg ⁻¹	1618	27	Modérée	0	0.96
AlM3 + FeM3	mmol kg ⁻¹	66	22	Modérée	0.001	0.97
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	250	46	Élevée	0	0.97
PSI	---	572	71	Très élevée	0.002	0.65

Selon le guide de référence en fertilisation (CRAAQ, 2003), la CFP est classée forte pour des champs présentant une teneur en Al_{M-3} de 1601 mg kg⁻¹ et plus. Des études précédentes réalisées par Vézina *et al.* (2000) dans douze régions agricoles et sur près de 200 séries de sols représentatives des principaux types de sol du Québec dont les séries de sols de la présente étude montrent que des champs présentant une teneur en Al_{M-3} de 1701 à 2200 mg kg⁻¹ ont une

CFP qualifiée de forte. D'autres études réalisées par Leclerc *et al.* (2001) dans la plaine de Montréal sur plusieurs séries de sols de la Montérégie vont dans le même sens. Cela confirme que le champ 1, le champ 2 et l'ensemble des champs ont une forte capacité de fixation de phosphore. La moyenne de Al_{M-3} dans le champ 2 est 1421 mg kg^{-1} . Sa CFP est moyenne. Ces résultats sont également conformes aux analyses et recommandations du guide de référence en fertilisation et aux résultats obtenus par Vézinal *et al.* (2000).

Dans le champ 1 et le champ 3, le coefficient de variation (CV) pour Al_{M-3} est de 24 % tandis qu'il est de 26 % pour le champ 2 (Tableau 11). Pour l'indicateur $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$, le CV est identique pour le champ 1 et le champ 3, soit 20 % et il est de 21 % au niveau du champ 2. Quant à l'indicateur $Al_{ox}+Fe_{ox}$, le CV est de 42 % pour le champ 1 tandis qu'il est de 48% pour le champ 2 et le champ 3. Enfin, pour l'indice de sorption de phosphore PSI, le CV est de 50 % pour le champ 1, de 101 % pour le champ 2 et de 48 % pour le champ 3 (Tableau 13). L'indice de CFP Al_{M-3} se retrouve dans la classe de variabilité modérée (15-35%) (Nolin *et al.*, 1997). Il en est de même pour $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$. Le CV de $Al_{ox}+Fe_{ox}$ se retrouve dans la classe élevée (35-50%), ceci montre que cet indicateur de la CFP présente une étendue de variation plus grande dans chacun des 3 champs que Al_{M-3} et $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$. Enfin, le CV de PSI se retrouve dans la classe de variabilité très élevée (CV = 50-100 %) dans le champ 1 et dans le champ 3 et extrêmement élevée (CV > 100%) dans le champ 2 lui conférant ainsi la plus grande variabilité spatiale parmi les indicateurs de la CFP étudiés dans ces 3 champs.

Une relation lie l'erreur relative de l'estimation (r) exprimant l'erreur permise en pourcentage de la moyenne et le coefficient de variation (CV) dans le calcul du nombre (n) d'échantillons (Nolin *et al.*, 1997) :

$$n = t^2 CV/r^2$$

n étant le nombre d'échantillons, t est la valeur tabulée de la statistique de Student et r, l'erreur relative de l'estimation. Ces mêmes auteurs estiment que plus la variabilité d'un descripteur est élevé, c'est-à-dire plus le CV est élevé, plus grand sera le nombre d'échantillons requis pour atteindre une précision donnée à un niveau de probabilité donné. Ainsi, avec une précision de 10 % et un niveau de probabilité de 90% (1 chance sur 10 de se tromper), PSI serait le premier indicateur de CFP qui exigerait un très grand nombre d'échantillons (n= 78 à plus de 310) pour estimer la moyenne des parcelles car le CV de cet indicateur est élevé à extrêmement élevé

selon le champ. L'indicateur $Al_{ox}+Fe_{ox}$ serait le deuxième indicateur de CFP qui exigerait également un nombre élevé d'échantillons ($n = 40-78$) car son CV est élevé dans chacun des champs et dans les trois champs réunis. À l'opposé, Al_{M-3} et $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$ sont les deux indicateurs de la CFP qui demanderaient un nombre d'échantillons relativement moins élevé pour estimer la moyenne des champs avec une précision de 10% car le CV de ces deux indicateurs est classé modéré ($n = 7-40$). Compte tenu du coût associé à l'échantillonnage des sols et aux analyses de laboratoire, Nolin *et al.* (1997) estiment que pour une taille d'échantillon donné, plus grande sera la variabilité, plus grande sera l'erreur relative de l'estimation de la moyenne du descripteur donné. D'autre part, la valeur de t augmentant avec le niveau de probabilité, plus on choisira un niveau de probabilité élevé (*i.e.* la chance de se tromper étant alors plus petite), plus grande sera alors l'étendue de l'intervalle de confiance de la moyenne et en conséquence, plus faible sera la précision de l'estimation. Dans le cas de cette étude, ce sont PSI et $Al_{ox}+Fe_{ox}$ qui sont les indicateurs de CFP qui, présentant une plus grande variabilité, seront estimés avec moins de précision pour un nombre d'échantillons donné.

En fin de compte, selon la valeur des CV, on obtient le classement suivant des quatre indicateurs de la CFP suivant un ordre de variabilité décroissante : $PSI > Al_{ox}+Fe_{ox} > Al_{M-3} > Al_{M-3}+Fe_{M-3}$ (Tableau 17). Les indicateurs de la CFP générées à partir du Fe et Al extraits avec la solution Mehlich-3 (analyse de routine) présentent donc une moins grande variabilité spatiale dans les parcelles étudiées que $Al_{ox}+Fe_{ox}$ et PSI. Pierce et Nowak (1999) considère l'amplitude de la variabilité spatiale présente à l'intérieur du champ comme un des critères techniques et économiques à considérer en agriculture de précision. Ainsi, l'amplitude doit être suffisamment élevée pour justifier un échantillonnage intensif. Une propriété de sol présentant une faible variabilité à l'intérieur d'un champ ne justifie généralement pas l'application modulée d'intrants. Elle ne doit pas non plus être trop importante en raison du coût associé à l'échantillonnage qui est fonction de la variabilité mesurée ou estimée (Nolin *et al.*, 1997). De plus,, en considérant la norme commerciale d'un seul échantillon de la couche de surface par hectare utilisée en agriculture de précision (Wolkowski et Wollenhaupt, 1994), lorsque la présence d'une structure spatiale est confirmée à partir de la variographie, une forte variabilité d'un indicateur ou d'un descripteur peut signifier une faible précision ou fiabilité d'interpolation ou qu'il peut être nécessaire de recourir à une densité d'échantillonnage plus forte pour mieux caractériser et gérer cette variabilité.

4.2 Paramètres de semivariogramme pour l'évaluation de la présence de structure spatiale des indicateurs de la CFP

L'échantillonnage permet de comprendre ce qui se passe dans une population donnée sans avoir à interroger chacun des individus, ce qui est pratique et économique. Dans le cas de notre étude, il fournit seulement de l'information sur le sol et plus précisément aux points d'où proviennent les échantillons mais n'en dit pas plus sur ce qui se passe entre les points échantillonnés. Ce sont les techniques d'interpolation spatiale qui permettent de connaître la distribution spatiale des propriétés pédologiques en divers points du champ agricole. Le krigeage, une de ces techniques d'interpolation, tient compte d'un certain nombre de facteurs tels que le nombre d'échantillon, l'intervalle entre les échantillons et la continuité spatiale de la propriété étudiée et associe une erreur d'estimation à chacun des points estimés afin d'évaluer la précision ainsi que la fiabilité de la prédiction. La fiabilité de la prédiction repose sur le nombre et la qualité des échantillons prélevés, sur l'importance de la relation spatiale des observations tel que définie par le degré d'ajustement du modèle choisi et par la contribution relative de la composante systématique par rapport à la composante aléatoire de la variabilité (Nolin *et al.*, 1997).

Dans cette section, nous répondrons à la question suivante : les quatre indicateurs de la CFP présentent-ils une structure spatiale bien définie à l'échelle de la parcelle agricole, tel que déduit à partir de l'analyse du ratio C/C_0+C (Tableaux 12 et 13)? Nous comparerons les indicateurs de la CFP entre eux pour savoir celui qui présente la structure spatiale la mieux définie et qui serait le plus efficace pour être cartographié par interpolation spatiale par krigeage. Si les trois parcelles sont combinées ensemble, quelle sera la valeur du ratio et quelle sera la taille des structures (portée)? Nous vérifierons également la présence de ces structures en anisotropie (structure différente selon la direction - portées majeure et mineure) en particulier dans le cas des parcelles combinées ($n = 164$), car le nombre d'échantillons prélevés dans chacun des champs pris individuellement est plutôt limité et la largeur des parcelles (100 m environ) est réduite pour utiliser cette technique avec fiabilité ($n= 36$ à 73).

Tableau 12 : Paramètres géostatistiques des modèles théoriques isotropes ajustés aux semivariogrammes expérimentaux pour chaque variable et chaque champ.

Variable	Modèle théorique	Portée A_0 (m)	Pépite C_0	Palier C_0+C	Ratio C/C_0+C
Champ 1 (n=55; longueur de l'intervalle = 30 m; nombre d'intervalle = 23)					
Al_{M-3}	Sphérique	687	15364	292774	0,95
$Al_{M-3}+Fe_{M-3}$	Sphérique	677	23	317	0,93
$Al_{ox}+Fe_{ox}$	Sphérique	523	4652	15042	0,69
PSI	Sphérique	414	45619	94798	0,52
Champ 2 (n=36; longueur de l'intervalle = 30 m; nombre d'intervalle = 23)					
Al_{M-3}	Sphérique	321	87626	247876	0,65
$Al_{M-3}+Fe_{M-3}$	Sphérique	311	103	272	0,62
$Al_{ox}+Fe_{ox}$	Sphérique	659	6283	23738	0,73
PSI	Sphérique	659	308540	685360	0,55
Champ 3 (n=73; longueur de l'intervalle = 30 m; nombre d'intervalle = 23)					
Al_{M-3}	Sphérique	116	32805	127603	0,74
$Al_{M-3}+Fe_{M-3}$	Sphérique	119	34	137	0,76
$Al_{ox}+Fe_{ox}$	Sphérique	659	11778	15772	0,25
PSI	Sphérique	99	33611	63515	0,47
Champs 1, 2 et 3 (n=164; longueur de l'intervalle = 30 m; nombre d'intervalle = 23)					
Al_{M-3}	Sphérique	179	24360	201380	0,88
$Al_{M-3}+Fe_{M-3}$	Sphérique	179	26	233	0,88
$Al_{ox}+Fe_{ox}$	Sphérique	687	10154	15550	0,34
PSI	Sphérique	559	152150	174703	0,12

Tableau 13 : Paramètres géostatistiques des modèles théoriques anisotropes ajustés au semivariogrammes expérimentaux pour chaque variable et chaque champ.

Variable	Modèle théorique	Portée majeure (m)	Portée mineure (m)	Pépité C_0	Palier C_0+C	Ratio C/C_0+C
Champ 1 (n=55; longueur de l'intervalle = 30 m; nombre d'intervalle = 23)						
Al _{M-3}	Sphérique	687	427	11173	238758	0,99
Al _{M-3} +Fe _{M-3}	Sphérique	687	407	18	274	0,93
Al _{ox} +Fe _{ox}	Sphérique	651	337	4543	15173	0,70
PSI	Sphérique	475	229	43842	94891	0,53
Champ 2 (n=36; longueur de l'intervalle = 30 m; nombre d'intervalle =23)						
Al _{M-3}	Sphérique	659	110	57324	248594	0,77
Al _{M-3} +Fe _{M-3}	Sphérique	659	108	70	273	0,74
Al _{ox} +Fe _{ox}	Sphérique	659	142	4003	19835	0,79
PSI	Sphérique	659	111	250970	614100	0,60
Champ 3 (n=73; longueur de l'intervalle = 30 m; nombre d'intervalle = 23)						
Al _{M-3}	Sphérique	650	85	31608	132668	0,76
Al _{M-3} +Fe _{M-3}	Sphérique	657	85	29	142	0,79
Al _{ox} +Fe _{ox}	Sphérique	651	85	6711	14552	0,53
PSI	Sphérique	659	85	34132	65549	0,47
Champs 1, 2 et 3 (n=164; longueur de l'intervalle = 30 m; nombre d'intervalle = 23)						
Al _{M-3}	Sphérique	687	130	32621	220291	0,85
Al _{M-3} +Fe _{M-3}	Sphérique	687	137	38	258	0,85
Al _{ox} +Fe _{ox}	Sphérique	687	115	5620	14238	0,60
PSI	Sphérique	687	148	110050	178484	0,38

Pour les trois champs, le modèle considéré est le modèle sphérique et l'intervalle de mesure et d'échantillonnage est de 30 m. La portée qui exprime la distance à partir de laquelle la semi-variance ne croît plus (*i.e.* quand les observations ne sont plus corrélées entre elles) varie en isotropie de 414 à 687 m dans le champ 1, de 310 à 659 m dans le champ 2, de 99 à 659 m dans le champ 3 et de 178 à 687 m dans l'ensemble des champs. En anisotropie, elle varie pour chacun des champs et pour l'ensemble des trois champs de 475 à 687 m pour la portée majeure et de 85 à 427 m pour la portée mineure. Le nombre d'intervalles considéré pour ces modèles est de 23 pour chaque champ.

Pour les trois champs, le ration $C / C_0 + C$ est toujours plus élevé pour les deux indicateurs (AIM3 et AIM3+ FeM3).

Le palier ($C_0 + C$) représente la somme de la variabilité aléatoire et de la variance structurale. Ce paramètre varie également pour chaque variable pédologique. Dans le champ 1, en isotropie, le palier prend une valeur de 292774 pour Al_{M-3} tandis qu'il est de 247876 dans le champ 2, de 127603 pour le champ 3 et de 201380 pour l'ensemble des trois champs (Tableau 12).

Tel que définie par le ratio $C / C_0 + C$, la structure spatiale de Al_{M-3} est mieux définie dans le champ 1 que dans le champ 2, le champ 3 et dans l'ensemble des trois champs. Les ratios obtenus en anisotropie (Tableau 13) illustrent la définition de la structure spatiale de chacun des indicateurs de la CFP dans les parcelles étudiées. Ainsi dans le champ 1, le ratio de Al_{M-3} est de 0.99 tandis qu'elle est de 0.77 dans le champ 2, de 0.76 dans le champ 3 et de 0.85 dans l'ensemble des trois champs. Le ratio de $Al_{M-3} + Fe_{M-3}$ est de 0.93 dans le champ 1, de 0.74 dans le champ 2, de 0.79 dans le champ 3 et de 0.85 dans l'ensemble des trois champs. Le ratio de l'indicateur $Al_{ox} + Fe_{ox}$ est de 0.70 dans le champ 1, de 0.79 dans le champ 2, de 0.53 et de 0.60 dans l'ensemble des trois. Quant à l'indicateur PSI, son ratio est de 0.53 dans le champ 1, de 0.59 dans le champ 2, de 0.47 dans le champ 3 et de 0.38 dans l'ensemble des trois champs. La valeur du ratio de $Al_{ox} + Fe_{ox}$ dans le champ 2 peut s'expliquer par le fait que ce champ était en prairie permanente (culture de foin) et que ce mode de culture et sa fertilisation favorisent le maintien des propriétés pédogénétiques tandis que le champ 1 et le champ 3 ont été en culture commerciale depuis plusieurs années (maïs-grain), ce qui favorise leur perturbation par le biais des labours.

D'un point de vue du classement de la structure spatiale des indicateurs, on peut établir l'ordre suivant : $Al_{M-3} \geq Al_{M-3}+Fe_{M-3} > Al_{ox}+Fe_{ox} > PSI$. Le classement des champs selon la présence de structure spatiale pour les indicateurs de la CFP, en particulier pour Al_{M-3} et $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$, suit l'ordre suivant : champ 1 > champ 2 > champ 3. La combinaison des trois champs se situe entre le champ 1 et le champ 2 dans le classement, donc permet en général d'améliorer la structure spatiale des indicateurs de la CFP en plus de mieux appuyer l'interpolation spatiale anisotrope. Ceci confirme non seulement la présence de structure spatiale pour les quatre indicateurs de la CFP à l'étude dans les trois champs mais aussi le degré de développement de la structure spatiale dans le cas de Al_{M-3} . On peut donc affirmer que les quatre indicateurs de la CFP présentent une structure spatiale bien définie à l'échelle de la parcelle agricole. Des quatre indicateurs étudiés, Al_{M-3} est l'indicateur le plus efficace pour réaliser la cartographie numérique de la capacité de fixation de phosphore.

Dans la plupart des cas étudiés (indicateurs et champs), l'approche anisotrope a permis de réduire la constante de pépite et d'augmenter le ratio C/C_0+C , donc de mieux définir la structure spatiale des indicateurs de la CFP. En se basant sur ce critère, l'approche anisotrope devrait donc être privilégiée à l'approche isotrope pour réaliser la cartographie numérique des indicateurs de la CFP

4.3 Corrélations entre les indicateurs de la CFP et les variables auxiliaires

Le tableau 14 présente les coefficients de corrélation de Pearson entre les quatre indicateurs de la CFP et les variables auxiliaires utilisées dans le cadre du présent projet de recherche. La conductivité électrique apparente mesurée à 30 cm (VERIS 3100), 100 cm (VERIS 3100) et 130 cm (Geonics EM-38) de profondeur à partir de la surface du sol montre des coefficients de corrélation de Pearson (r) plus grand que 0,70, soit respectivement $r = -0.73$, $r = -0.79$ et $r = -0.81$ pour Al_{M-3} . Cambouris *et al.*, 2006 ont obtenu des corrélations de $r = -0,72$ et $r = -0,70$ pour la profondeur au substratum en argile. Il y a donc un effet de la profondeur de la mesure de la CEA sur la pédologie. Ces résultats montrent que la variation de l'indicateur Al_{M-3} peut être associée à celle de la conductivité électrique apparente mesurée à différentes profondeurs. La présence d'une forte corrélation entre la CEA et Al_{M-3} à différentes profondeurs suggère que la CEA mesurée avec ces appareils pourrait servir de variable auxiliaire efficace pour réduire l'erreur associée à l'interpolation spatiale de cet indicateur de la

CFP par co-krigeage ou comme stratificateur lors de la segmentation des parcelles en zones d'aménagement. Des valeurs de corrélation similaires ont été obtenues pour l'indicateur $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$. Les travaux de Sudduth *et al.* (2003) montrent également des corrélations élevées entre la CEA à 130 cm, la CEA à 100 cm et la teneur en argile du sol et la texture du sol.

Parmi les informations extraites des images multispectrales aéroportées utilisées comme variables auxiliaires, seules les bandes 1 et 2 (vert et rouge) présentent respectivement des corrélations supérieures à 0,50 avec Al_{M-3} , soit respectivement 0,55 et 0,51. D'autre part, les faibles corrélations ($r < 0,50$) qui existent entre les bandes des images ASTER sont peut être dues au fait que les bruits reliés aux pixels n'ont pas été filtrés comme dans le cas des bandes d'Ikonos. Plusieurs de ces corrélations sont significatives.

Leclerc et Nolin (2006) ont étudié plusieurs propriétés de sol et des indicateurs de fertilité dont l' Al_{M3} , une propriété reliée à la CFP. Cet indicateur de fertilité et la CEA montraient des corrélations de $r = -0,76$ et $r = -0,82$ respectivement dans deux champs agricoles ayant des conditions pédologiques semblant aux conditions pédologiques de notre site d'étude. Ces résultats corroborent ceux de notre étude. Pour l'image ASTER, les bandes spectrales utilisées dans cette étude sont celles du visible et du proche infrarouge alors que les bandes spectrales de l'image aéroportées sont des bandes du visible. Certaines bandes ainsi que des informations extraites de l'image IKONOS présentent des corrélations supérieures à 0,70. Il semble que le filtrage 5X5 permet d'améliorer la corrélation en éliminant le bruit.

Tableau 14 : Corrélation de Pearson entre les indicateurs de la CFP et les variables auxiliaires.

Variabiles Auxiliaires	AIM3	AIM3 + FeM3	Alox+ Feox	PSI
Élévation	0,57 ***	0,55 ***	0,55 ***	0,32 **
PENTE_	-0,12	-0,12	-0,15	-0,13
Indice_humidité	0,02	0,02	0,02	0,11
ASTER00_1	-0,10	-0,15	0,10	-0,05
ASTER00_2	0,23 **	0,17	0,35 ***	0,15
ASTER00_3	0,30 ***	0,26 *	0,33 **	0,10
ASTER00_4	0,41 ***	0,37	0,48 ***	0,28 **
ASTER00_5	-0,16	-0,19	0,08	0,10
ASTER00_6	-0,11	-0,14	0,10	0,15
ASTER00_7	0,14	0,10	0,32 **	0,20
ASTER00_8	0,01	-0,03	0,21 **	0,13
ASTER00_9	0,06	0,02	0,24 **	0,14
ASTER05_1	-0,02	-0,05	0,12	0,03
ASTER05_2	0,32 **	0,28 **	0,46 ***	0,24 *
ASTER05_3	0,36 ***	0,33 ***	0,40 ***	0,14
ASTER05_4	0,59 ***	0,56 ***	0,59 ***	0,29 **
ASTER05_5	0,43 ***	0,40 ***	0,46 ***	0,26 *
ASTER05_6	0,52 ***	0,50 ***	0,54	0,26
ASTER05_7	0,49 ***	0,46 ***	0,52 ***	0,26 *
ASTER05_8	0,40 ***	0,38 ***	0,45 ***	0,25 *
ASTER05_9	0,46 ***	0,44 ***	0,46 ***	0,26 *
Image OAM_1	0,55 ***	0,55 ***	0,33 **	0,25 *
Image OAM_2	0,51 ***	0,51 ***	0,27 *	0,17
Image OAM_3	0,34 ***	0,36 ***	0,08	0,11
Ikonos_V1	-0,17	-0,15	-0,38 ***	-0,14
Ikonos_R1	0,08	0,08	-0,15	0,07
Ikonos B1	0,39 ***	0,38 ***	0,18	0,29 **
Ikonos_PIR1	0,60	0,60 ***	0,37 ***	0,39 ***
VERT3	-0,24 *	-0,22 *	-0,46 ***	-0,20
ROUGE3	-0,01	-0,02	-0,19	-0,03
BLEU3	0,42 ***	0,42 ***	0,19	0,23 *
PIR3	0,48 ***	0,46 ***	0,30 **	0,27 *
VERT5	-0,28	-0,26 *	-0,46 ***	-0,23 *
ROUGE5	0,04	0,04	-0,17	0,35
BLEU5	0,45 ***	0,45 ***	0,22 *	0,22
PIR5	0,72 ***	0,72 ***	0,44 ***	0,35
Indice brillance 1	0,17	0,17	-0,06	0,14
Indice brillance 3	0,13	0,13	-0,06	0,14
Indice brillance 5	0,16	0,16	-0,10	0,05
Indice de rougeur 1	0,50 ***	0,48	-0,07	0,04
Indice de rougeur 3	0,11	0,07	0,43 ***	0,39
Indice de rougeur 5	0,72 ***	0,69	0,11	0,09
Indice de couleur 1	-0,51 ***	-0,50 ***	0,63 ***	0,43 ***
Indice de couleur 3	-0,24 *	-0,27 *	-0,32 **	-0,33
Indice de couleur 5	-0,62 ***	-0,62 ***	-0,16	-0,12

SAVII	0,56	***	0,55	***	0,56		0,33
SAVI3	0,18		0,16		0,21	*	0,12
SAVI5	0,75	***	0,75	***	0,68	***	0,42
Geonics EM 38 (0-150 cm)	-0,81	***	-0,80	***	-0,64	***	-0,42
VERIS 3100 (0-30 cm)	-0,73	***	-0,70	***	-0,60	***	-0,38
VERIS 3100 (0-100 cm)	-0,79	***	-0,78	***	-0,65	***	-0,41

*, **, *** = significatif respectivement à 0.05, 0.01, 0.001.

OAM: Optique aéroportée multispectrale; PIR: proche infra rouge; 1: valeur au point;

3 : valeur selon 3X3 pixels et 5: valeur selon 5X5 pixels.

4.3.1 Analyse des structures spatiales des variables auxiliaires

Nous avons étudié la présence des structures spatiales (tableau 15) pour tous les variables auxiliaires utilisés dans cette étude. L'analyse des semi-variogrammes a été réalisée avec le module Spatial Analyst de ArcGIS (ESRI, 2003) comme fe dut le cas pour les indicateurs de la CFP. Le modèle sphérique a été choisi de même que l'orientation anisotropique des stuctures. Toutes les variables auxiliaires densément mesurées présentent un ratio supérieur à 0,50 à l'exception de la bande rouge de l'image Ikonos (0,49). On observe donc une forte structure apatiale pour les variables auxiliaires, ce qui permet de les utiliser pour une interpolation soutenue (co-krigage) dans la prédiction des indicateurs de CFP.

Tableau 15 : Ratio des variables auxiliaires utilisées dans l'étude.

Variables auxiliaires	Ratio (C/Co +C)
Geonics EM38	0,97
VERIS 3100 (0-100 cm)	0,59
VERIS 3100 (0-30 cm)	0,65
IKonos- bande 1 (B)	0,70
IKonos- bande 2 (V)	0,59
IKonos- bande 3 (R)	0,49
IKonos- bande 4 (PIR)	0,71
ASTER 05 bande 1 (V)	0,94
ASTER 05 bande 2 (R)	0,98
ASTER 05 bande 3 (PIR)	0,97
ASTER 00 bande 1 (V)	0,90
ASTER 00 bande 2 (R)	0,75
ASTER 00 bande 3 (PIR)	0,81
OMA bande 1 (V)	0,80
OMA bande 2 (R)	0,74
OMA bande 3 (PIR)	0,60

4.4 Qualité de l'interpolation spatiale par krigeage et co-krigeage

Pour évaluer la qualité de l'interpolation spatiale par krigeage ou co-krigeage généré à partir du module «*Geostatistical Analyst*» d'ArcGIS 9 (ESRI, 2003), on examine les quatre paramètres de validation croisée (voir Chapitre 2 pour les explications). Ainsi,

- 1) l'erreur moyenne standardisée (EMS) doit tendre vers 0;
- 2) l'erreur quadratique moyenne standardisée (EQMS) doit tendre vers 1;
- 3) l'erreur standard moyenne (ESM) doit être le plus près possible de l'erreur quadratique moyenne de prédiction (RMS); et
- 4) l'objectif consiste à choisir le modèle et les paramètres de recherche qui vont permettre de minimiser ESM ou le RSM.

La méthodologie consiste à évaluer suite à l'interpolation (krigeage) des données des trois parcelles prises individuellement et ensemble (champ1, champ 2 et champ 3) puisque cette dernière approche s'est avérée être la plus robuste en termes de nombre d'échantillons ($n=164$) ainsi que celle permettant de réduire globalement la constante de pépité (C_0) et d'augmenter le ratio C/C_0+C . Pour chaque indicateur de la CFP, en particulier pour Al_{M-3} qui s'est avéré présenter la structure spatiale la mieux définie parmi les quatre indicateurs, nous serons en mesure de dire laquelle ou lesquelles parmi les variables auxiliaires permettent de générer l'interpolation spatiale la plus fiable et la plus précise (*i.e.* la plus faible ESM ou la plus faible RMS, relativement à l'échelle de mesure propre de cette variable) et globalement en analysant les valeurs des quatre paramètres (EMS, EQMS, RMS et ESM). Par la suite, on évaluera la valeur de ESM et des autres paramètres de chaque indicateur de la CFP interpolé par co-krigeage à l'aide des variables auxiliaires : conductivité électrique apparente (trois méthodes), informations spectrales extraites des images multispectrales satellitaires ou aéroportées (Tableaux 16, 17, 18, 19). Une diminution de la valeur du ESM ou RSM suite à une interpolation spatiale par co-krigeage par rapport à une interpolation simple est synonyme d'efficacité de la variable auxiliaire à réaliser la cartographie numérique de l'indicateur de la CFP qui nous intéresse. Il est à noter que l'approche anisotrope est comparée à l'approche isotrope pour chaque interpolation que ce soit en interpolation simple (krigeage) ou en interpolation soutenue par co-krigeage (Tableaux 16, 17, 18, 19) afin de voir comment la prise en compte de l'anisotropie améliore le modèle et la qualité de l'interpolation spatiale. Une carte numérique des indicateurs sera produite pour la stratégie d'interpolation qui aura la plus grande fiabilité et la plus grande précision (faible ESM).

La variabilité spatiale des différents indicateurs de la CFP a été modélisée à l'aide d'un semi-variogramme. Un modèle théorique sphérique a été choisi pour toutes les propriétés pédologiques à l'étude.

Tableau 16 : Paramètres statistiques décrivant la qualité de l'interpolation spatiale des indicateurs de la CFP au moyen d'un krigeage simple isotrope.

Variables			Paramètres de qualité de l'interpolation				
Code	Unité	Moyenne	ESM	ESM* (%)	RMS	EMS	EQMS
Champ 1							
AIM3	mg kg ⁻¹	1793	198	11	200	0,01	1,00
AIM3 + FeM3	mmol kg ⁻¹	72	7	9,7	7	0,01	1,01
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	259	80	31	77	0,00	0,98
PSI	- - -	564	242	43	244	0,00	1,00
Champ 2							
AIM3	mg kg ⁻¹	1752	361	21	341	0,00	0,95
AIM3 + FeM3	mmol kg ⁻¹	71	12	17	11	0,00	0,94
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	247	93	38	92	-0,01	0,98
PSI	- - -	693	617	89	709	0,00	1,14
Champ 3							
AIM3	mg kg ⁻¹	1421	271	19	249	0,00	0,92
AIM3 + FeM3	mmol kg ⁻¹	58	8	14	8	0,00	0,92
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	244	113	46	110	0,00	0,96
PSI	- - -	519	229	44	219	0,00	0,95
Champs 1, 2 et 3 combinés							
AIM3	mg kg ⁻¹	1618	265	16	254	0,00	0,96
AIM3 + FeM3	mmol kg ⁻¹	66	8	12	8	0,00	0,97
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	250	106	42	94	0,00	0,89
PSI	- - -	572	404	71	383	0,00	0,95

* Valeur de EMS exprimée en pourcentage de la moyenne du ou des champs étudiés.

Tableau 17 : Paramètres statistiques décrivant la qualité de l'interpolation spatiale des indicateurs de la CFP au moyen d'un krigeage simple anisotrope.

Variables			Paramètres de qualité de l'interpolation				
Code	Unité	Moyenne	ESM	ESM* (%)	RMS	EMS	EQMS
Champ 1							
AIM3	mg kg ⁻¹	1793	189	10,5	196	0,01	1,04
AIM3 + FeM3	mmol kg ⁻¹	72	7	9,7	7	0,00	1,03
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	259	80	31	77	0,00	0,98
PSI	- - -	564	241	43	243	0,00	1,00
Champ 2							
AIM3	mg kg ⁻¹	1752	324	18	328	0,00	1,02
AIM3 + FeM3	mmol kg ⁻¹	71	11	15	11	0,00	1,01
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	247	84	34	82	0,00	0,97
PSI	- - -	693	591	85	711	0,01	1,18
Champ 3							
AIM3	mg kg ⁻¹	1421	235	17	217	0,00	0,93
AIM3 + FeM3	mmol kg ⁻¹	58	6	10	7	0,00	0,94
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	244	96	39	85	0,00	0,89
PSI	- - -	519	212	41	193	-0,01	0,91
Champs 1, 2 et 3 combinés							
AIM3	mg kg ⁻¹	1618	253	16	236	0,00	0,93
AIM3 + FeM3	mmol kg ⁻¹	66	8	12	8	0,00	0,92
Alox + Feox	mmol kg ⁻¹	250	87	35	86	0,00	0,98
PSI	- - -	572	361	63	372	0,00	1,03

* Valeur de EMS exprimée en pourcentage de la moyenne du ou des champs étudiés.

Tableau 18 : Paramètres statistiques décrivant la qualité de l'interpolation spatiale de Al_{M-3} ($mg\ kg^{-1}$) par krigeage simple et co-krigeage à partir de variables auxiliaires (approche isotrope).

Interpolation spatiale		Paramètres de qualité de l'interpolation				
Méthode	Variable auxiliaire	ESM	ESM* (%)	RMS	EMS**	EQMS
Champs 1, 2 et 3 combinés						
Krigeage	- - -	265	16,37	254	0,003337	0,96
Co-krigeage	CEA à 30 cm (VERIS)	262	16,19	247	-0,003823	0,94
Co-krigeage	CEA à 100 cm (VERIS)	262	16,19	249	0,01244	1,18
Co-krigeage	CEA à 130 cm (EM-38)	215	13,28	208	0,009916	0,96
Co-krigeage	Bande 1 – ASTER00 (V)	407	25,15	280	-0,003529	0,68
Co-krigeage	Bande 2 – ASTER00 (R)	307	18,97	258	0,003006	0,83
Co-krigeage	Bande 3 – ASTER00 (PIR)	279	17,24	250	-0,011746	0,89
Co-krigeage	Bande 1 – ASTER05 (V)	267	16,50	254	0,006492	0,95
Co-krigeage	Bande 2 – ASTER05 (R)	265	16,37	254	0,003507	0,96
Co-krigeage	Bande 3 – ASTER05 (PIR)	272	16,81	250	0,009081	0,92
Co-krigeage	Bande 1 – OAM (V)	245	15,14	253	0,002583	1,03
Co-krigeage	Bande 2 – OAM (R)	246	15,20	252	0,001586	1,02
Co-krigeage	Bande 3 – OAM (PIR)	255	15,76	256	0,003493	1,00
Co-krigeage	Bande 1 – Ikonos (B)	258	15,94	251	-0,002534	0,97
Co-krigeage	Bande 2 – Ikonos (V)	408	25,21	281	-0,004079	0,69
Co-krigeage	Bande 3 – Ikonos (R)	408	25,21	281	-0,004054	0,69
Co-krigeage	Bande 4 – Ikonos (PIR)	288	17,79	254	-0,002977	0,88

* Valeur de EMS exprimée en pourcentage de la moyenne des trois champs combinés, soit $1618\ mg\ kg^{-1}$.

**Erreur standardisée de prédiction.

ESM et RMS sont exprimés en $mg\ kg^{-1}$.

Tableau 19 : Paramètres statistiques décrivant la qualité de l'interpolation spatiale de AIM-3 (mg kg⁻¹) par krigeage simple et co-krigeage à partir de variables auxiliaires (approche anisotrope).

Interpolation spatiale		Paramètres de qualité de l'interpolation				
Méthode	Variable auxiliaire	ESM	ESM* (%)	RMS	EMS**	EQMS
Champs 1, 2 et 3 combinés						
Krigeage	- - -	254	15,64	236	-0,004414	0,93
Co-krigeage	CEA à 30 cm (VERIS)	245	15,14	236	-0,008222	0,96
Co-krigeage	CEA à 100 cm (VERIS)	252	15,57	234	0,003118	0,93
Co-krigeage	CEA à 130 cm (EM-38)	246	15,20	211	-0,004464	0,85
Co-krigeage	Bande 1 – ASTER00 (V)	266	16,44	237	0,002579	0,89
Co-krigeage	Bande 2 – ASTER00 (R)	271	16,75	241	0,002296	0,89
Co-krigeage	Bande 3 – ASTER00 (PIR)	264	16,32	232	-0,001512	0,88
Co-krigeage	Bande 1 – ASTER05 (V)	263	16,25	240	0,001875	0,91
Co-krigeage	Bande 2 – ASTER05 (R)	260	16,07	238	0,001687	0,91
Co-krigeage	Bande 3 – ASTER05 (PIR)	260	16,07	238	0,01966	0,91
Co-krigeage	Bande 1 – OAM (V)	273	16,87	241	-0,001077	0,88
Co-krigeage	Bande 2 – OAM (R)	284	17,55	245	0,002452	0,85
Co-krigeage	Bande 3 – OAM (PIR)	302	18,67	262	0,002845	0,86
Co-krigeage	Bande 1 – Ikonos (B)	247	15,27	235	-0,006397	0,95
Co-krigeage	Bande 2 – Ikonos (V)	254	15,70	237	-0,002445	0,93
Co-krigeage	Bande 3 – Ikonos (R)	257	15,88	238	-0,002023	0,92
Co-krigeage	Bande 4 – Ikonos (PIR)	271	16,75	238	-0,002706	0,87

* Valeur de EMS exprimée en pourcentage de la moyenne des trois champs combinés, soit 1618 mg kg⁻¹).

**Erreur standardisée de prédiction.

ESM et RMS sont exprimés en mg kg⁻¹.

La comparaison de l'ensemble des valeurs de ESM et de RMS dans les deux approches (isotrope et anisotrope) montre que l'approche anisotrope donne généralement de meilleures estimations que l'approche isotrope. En effet, on obtient pour l'ensemble des variables auxiliaires utilisées, la valeur moyenne moyenne de ESM en isotropie est de 290 mg kg⁻¹ et celle de RMS est de 255 mg kg⁻¹ tandis que en anisotropie, la valeur moyenne de ESM est de 263 mg kg⁻¹ et celle de RMS est de 238 255 mg kg⁻¹. Tous les variables auxiliaires réduisent

l'erreur d'interpolation presque dans les mêmes proportions. Ces dernières sont toutes corrélées avec les indicateurs de la CFP en plus d'avoir un degré de développement de structure modérée à forte. La technologie du VERIS serait aussi efficace comme celle du Geonics EM 38 si la collecte des données de la CEA avait été réalisée dans les conditions idéales. Le filtrage des images (3x3 pixels ou 5x5 pixels) qui permet d'éliminer les bruits dans les images aurait pu permettre également de diminuer l'erreur d'interpolation.

4.5 Impact de la taille de l'échantillon sur la carte numérique de la capacité de fixation du phosphore

Afin d'évaluer l'impact de la taille de l'échantillonnage sur la CFP du site étudié, nous avons choisi de réaliser des cartes numériques à partir de quelques densités d'échantillonnage (10,4 éch. /ha, 7 éch. /ha et 1,3 éch. /ha) pour générer une carte de CFP par co-krigeage dans une orientation anisotrope de la structure spatiale (figure 24a,b,c).

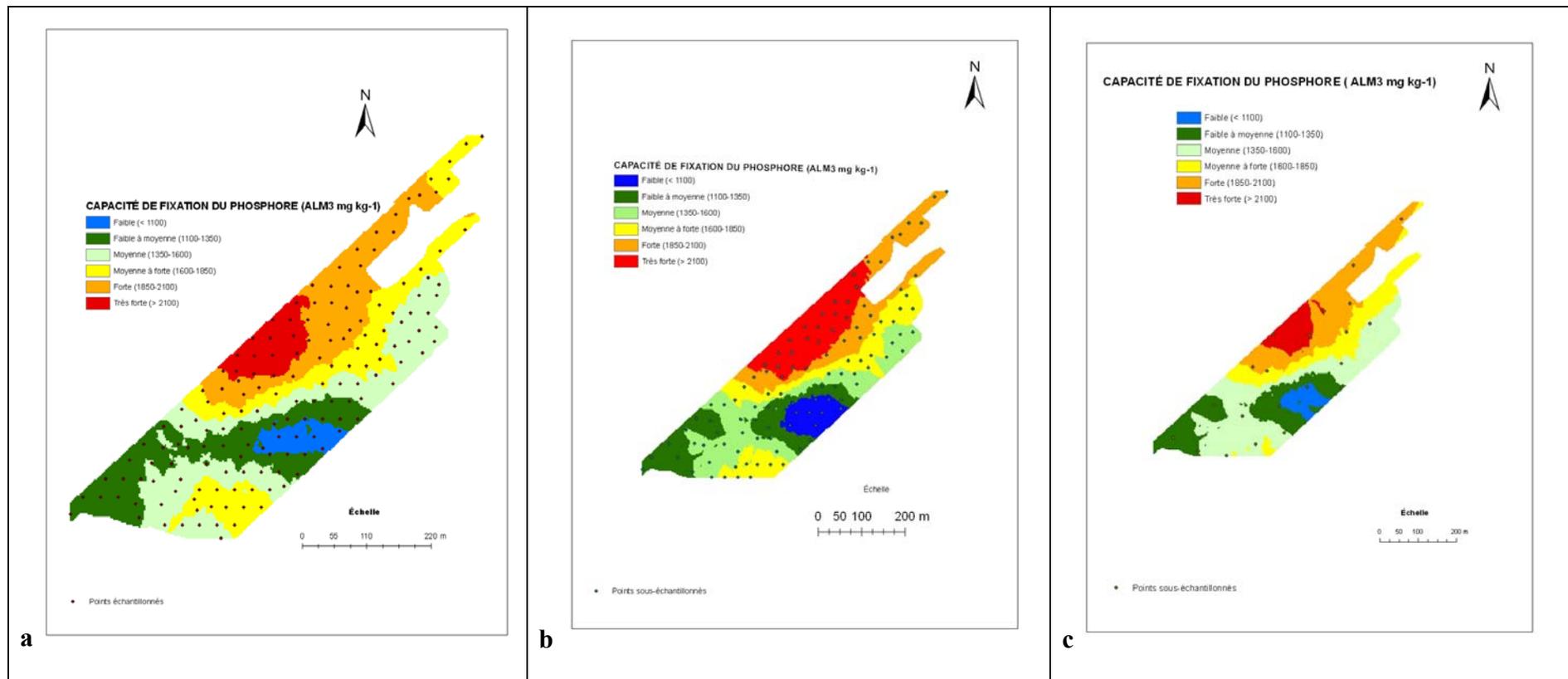


Figure 24 : Carte numérique de la CFP des sols des 3 champs à l'étude générée par co-krigeage à partir des données de la CEA mesurée à 130 cm avec le Geonics EM 38 a) 164 points de la grille d'échantillonnage (100 %, ESM= 215 mgkg⁻¹); b) 110 points de la grille d'échantillonnage (66 %, ESM = 217 mg kg⁻¹) et c) 21 points de la grille d'échantillonnage (13 %, ESM = 245 mg kg⁻¹).

4.6 Discussion générale des résultats

La première carte (Figure 24 a, b, c) montre la répartition de la CFP (AIM-3) à travers les champs étudiés selon la densité d'échantillonnage. La zone ayant la plus faible capacité de fixation de P ($< 1100 \text{ mg kg}^{-1}$) et celle ayant une CFP faible à moyenne ($1100\text{-}1350 \text{ mg kg}^{-1}$) correspondent en majorité aux sols de la série Le Bras, lesquels appartiennent au sous-groupe des Gleysols humiques orthiques (système canadien de classification des sols) ayant une texture loameuse (interprétation visuelle). Ces sols sont mal drainés (Bossé, 2007). Les gleysols de texture grossière, les sables et les loam sableux ont souvent une capacité de fixation du P beaucoup plus faible que celle de l'ensemble des podzols qui sont pourtant presque tous de texture grossière (Vézina *et al.*, 2000). Cette cartographie confirme les résultats de travaux de recherche de Vézina *et al.* (2000) qui portaient sur une proposition de regroupement des sols du Québec selon leur CFP en relation avec leurs caractéristiques pédologiques. Par ailleurs, on constate que la zone ayant une CFP moyenne à forte ($1600\text{-}1850 \text{ mg kg}^{-1}$), celle ayant une CFP forte ($1850\text{-}2100 \text{ mg kg}^{-1}$) et celle ayant une CFP qualifiée de très forte ($> 2100 \text{ mg kg}^{-1}$) correspondent en grande partie aux sols de la série Valère dont la classification taxonomique (sous-groupe) est Podzol humo-ferrique gleyfié. Il s'agit de sols sableux imparfaitement drainés. Cette cartographie épouse le constat de Vézina *et al.* (2000) dont l'étude révèle que certains podzols, rapidement et très rapidement drainés, présentent une CFP forte à très forte comparativement aux séries de sols imparfaitement à mal drainés et gleyfiés qui ont une CFP plus faible. Malgré la prédominance de ces deux grands groupes de sols, les trois champs bénéficient d'une bonne diversité de sols et l'on retrouve d'autres séries de sols comme la série Des Orignaux appartenant au sous-groupe des brunisols dystriques gleyfiés. Ce sont des sols loameux-grossiers imparfaitement drainés (Bossé, 2007). Cette série de sol se retrouve en partie dans la zone ayant une très forte CFP ($> 2100 \text{ mg kg}^{-1}$). Il s'agit de sols acides ($\text{pH} = 5,5$). Ces brunisols dystriques acides ont subi un lessivage de leurs bases et s'apparentent aux podzols (Vézina *et al.* 2000). Dans le but de valider scientifiquement l'interprétation visuelle des cartes, nous avons réalisé une cartographie numérique de la CFP du site d'étude selon les densités précédemment considérées et selon les superficies occupées par chaque classe de CFP par une démarche quantitative en se servant des facilités d'ArcGIS (Figure 25, 26, 27). La figure 28 compare les superficies occupées par chacune des classes de CFP selon la densité

d'échantillonnage utilisée. En supposant comme vrai la distribution obtenue à partir de la densité la plus forte, les histogrammes montrent les superficies occupées par les classes de CFP pour les densités plus faibles (Figure 28).

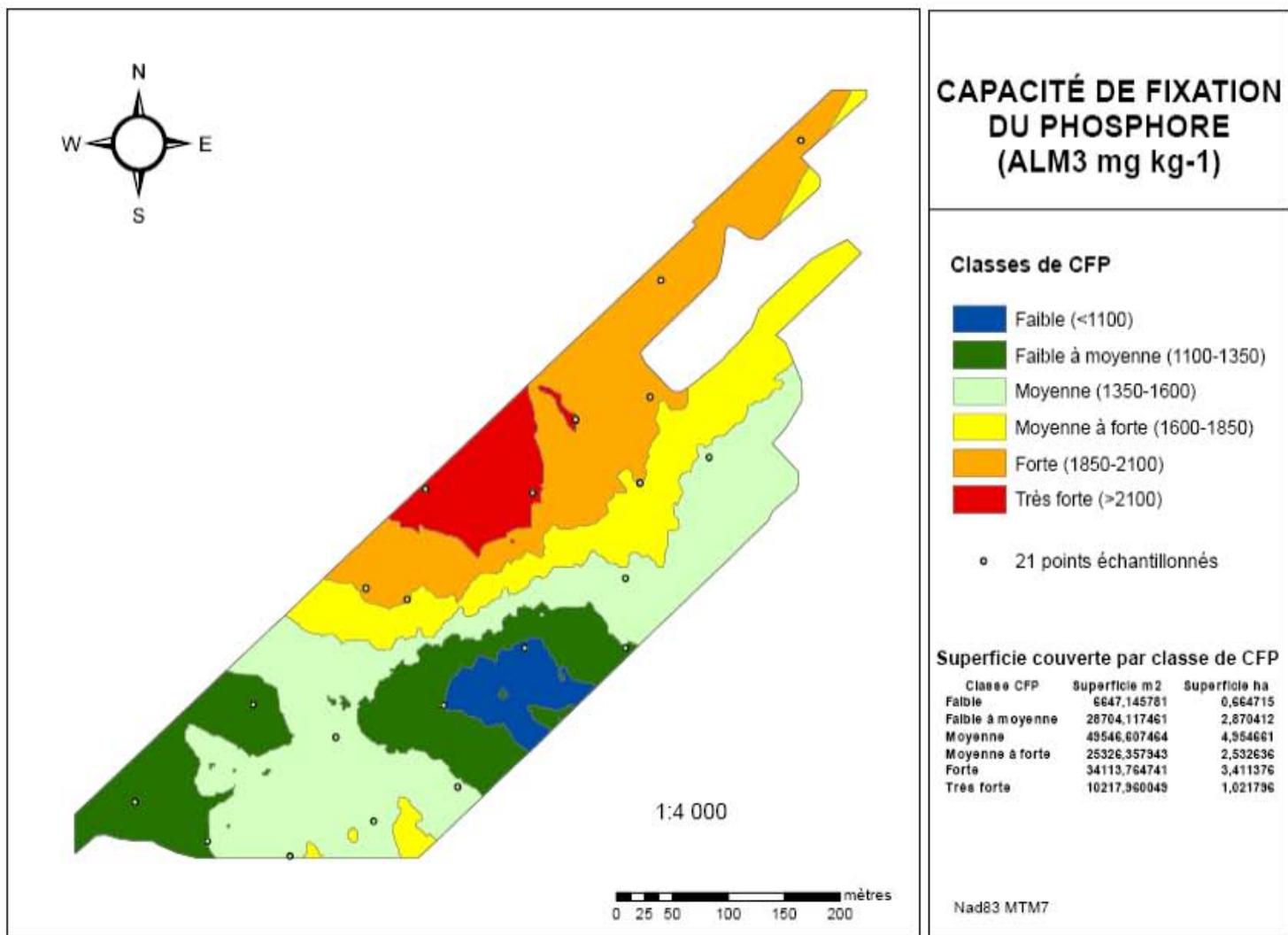


Figure 25 : Cartographie de la CFP (ALM3 mg kg⁻¹) selon la densité de'échantillonnage (n=21 éch. ha⁻¹).

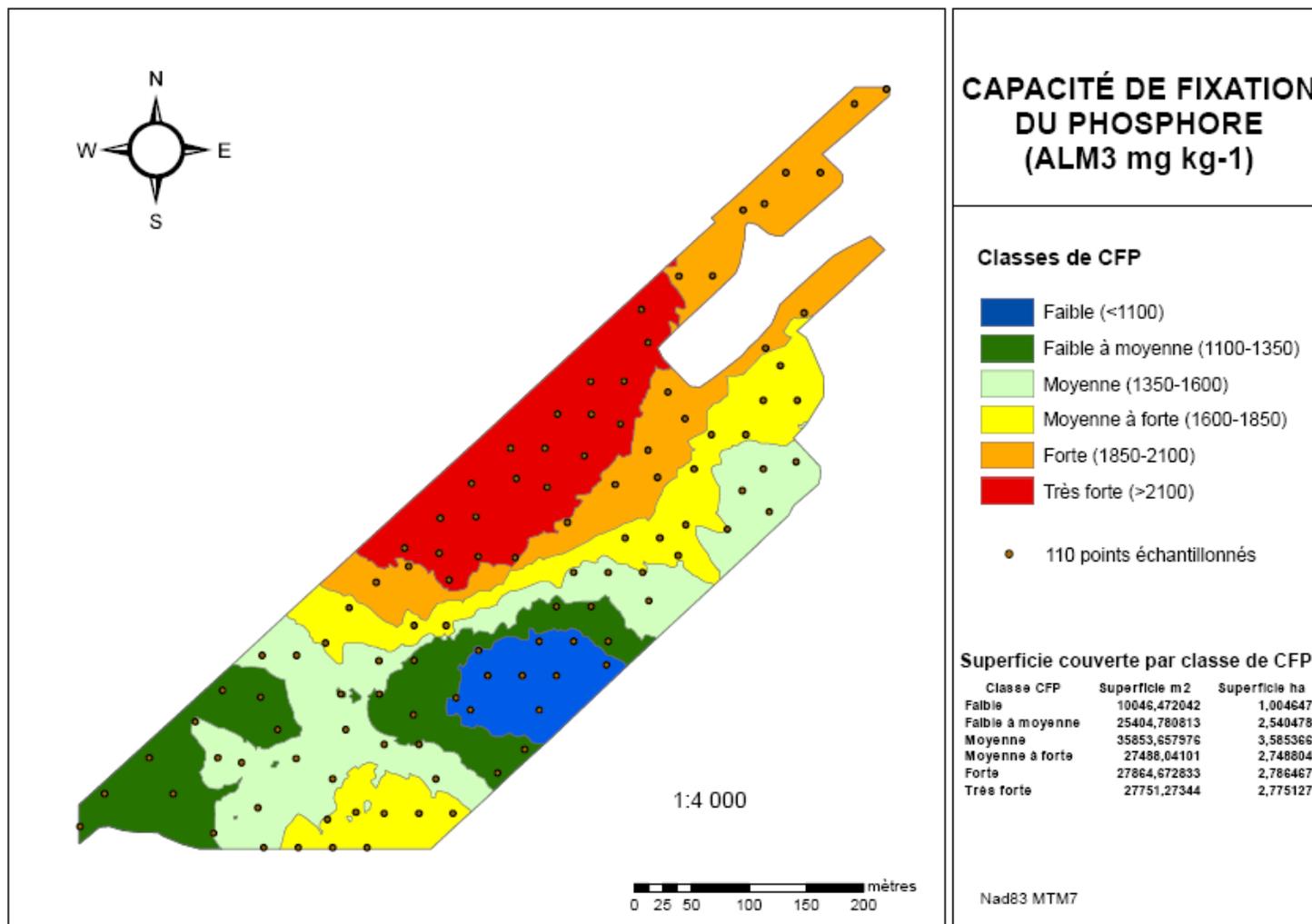


Figure 26 : Cartographie de la CFP (ALM3 mg kg⁻¹) selon la densité de'échantillonnage (n=110 éch. ha⁻¹).

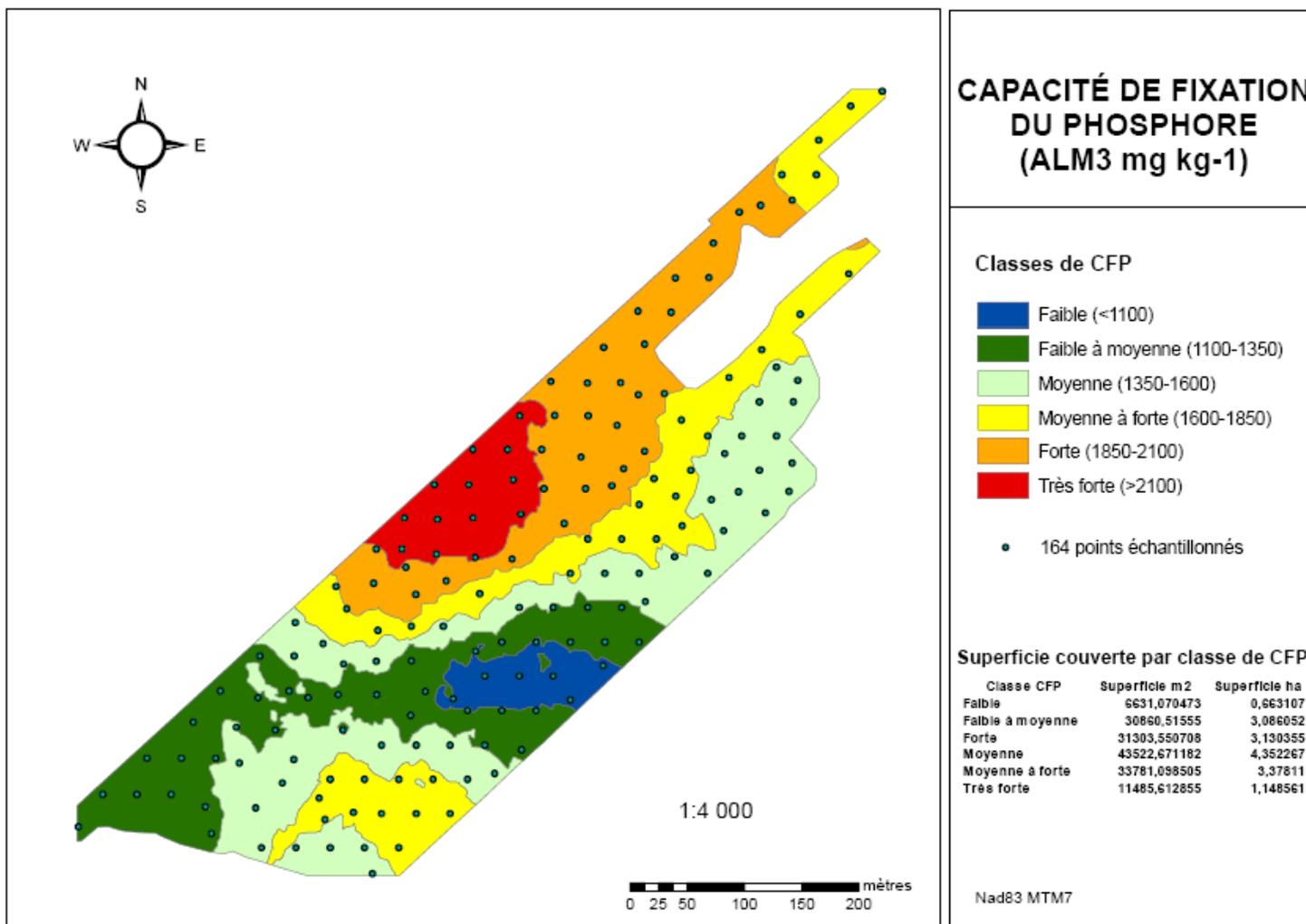


Figure 27 : Cartographie de la CFP (ALM3 mg kg⁻¹) selon la densité de'échantillonnage (n=164 éch. ha⁻¹).

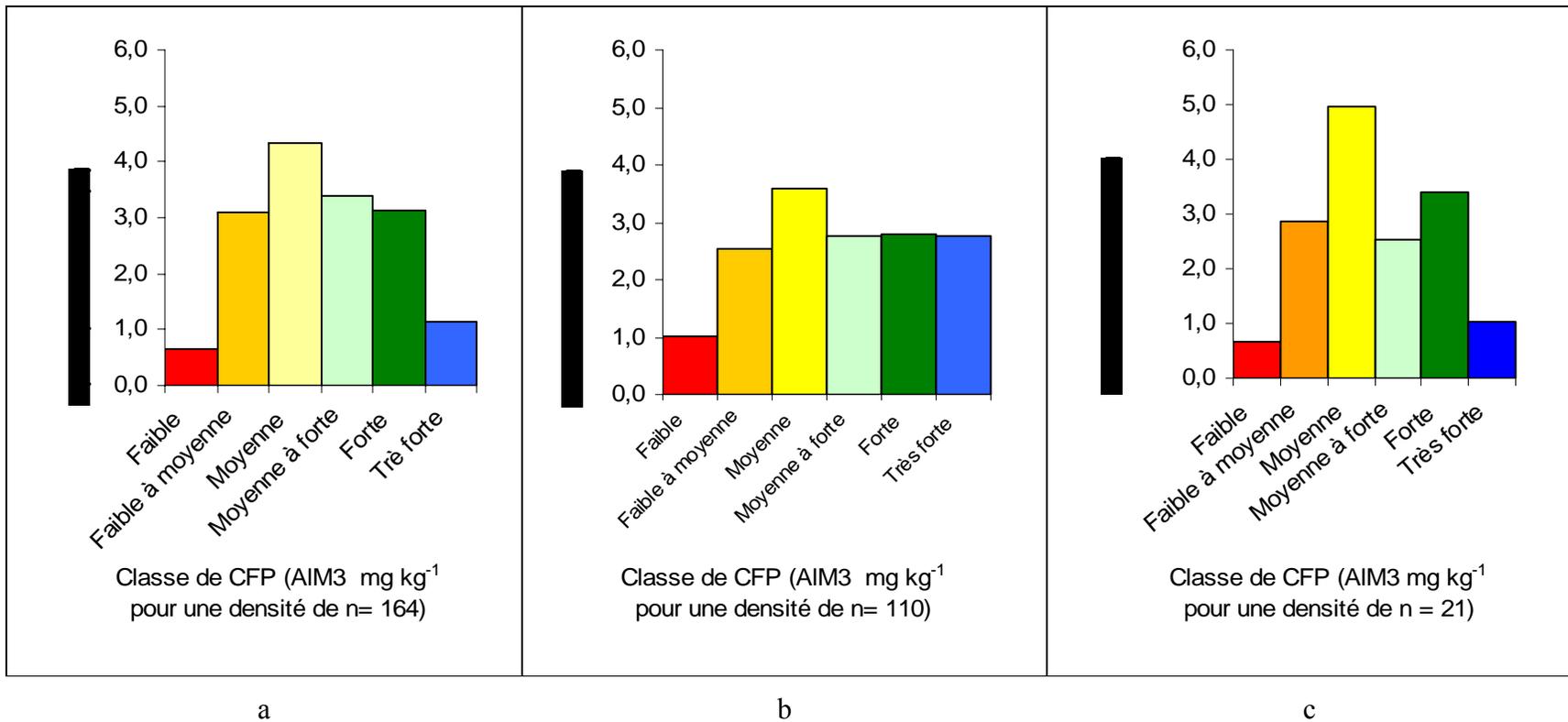


Figure 28 : Illustration des superficies occupées par les classes de CFP (AIM3 mg kg⁻¹) selon les densités a, b et c.

4.5 Conclusion

En somme, il est aisé de constater que les quatre indicateurs de la CFP à l'étude présentent des structures spatiales à l'échelle parcellaire qui permettent de les interpoler et d'associer une erreur moyenne d'estimation utile à l'évaluation de la précision ainsi qu'à la fiabilité de l'interpolation. Cependant, c'est Al_{M-3} qui semble être l'indicateur de la CFP le plus efficace pour réaliser une cartographie numérique de cette propriété du sol. Les différentes variables auxiliaires utilisées dans cette étude (variable géophysique densément mesurées comme la CEA, variables densément mesurés par télédétection) présentent également un degré de développement de structure spatiale convenable qui permet de les utiliser adéquatement comme variable auxiliaire. Elles présentent donc des potentiels semblables pour le co-krigeage. L'erreur standard moyenne (ESM) tout comme l'erreur quadratique moyenne (RMS) obtenue par co-krigeage avec le Geonics EM-38 ou par les autres variables auxiliaires n'est pas suffisante pour atteindre une précision de 10 % dans l'estimation de la moyenne avec une probabilité de 90 % plus particulièrement dans le cas de l'anisotropie. Puisque la fiabilité de la prédiction de Al_{M-3} repose non seulement sur la contribution relative de la composante aléatoire ou (et) de la composante systématique de la variabilité mais aussi sur le nombre et la qualité des échantillons prélevés, nous étudierons dans le chapitre suivant la stratégie d'échantillonnage et la compareront à celle recommandée en agriculture de précision (Wallenhaupt et Wolkowski 1994) afin d'en dégager une stratégie d'échantillonnage relativement adaptée aux sols du Québec et de l'est du Canada dans un contexte pédoclimatique particulier. Étant donné qu'une orientation anisotrope de la structure spatiale génère de façon générale des interpolations spatiales plus précises que l'approche isotrope, cette approche serait privilégiée dans le prochain chapitre.

5. ÉTUDE DE LA STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA CFP

Un échantillon est un sous ensemble d'éléments d'une population choisis au hasard par l'expérimentateur. Il représente une partie de celle-ci. Il est habituellement de taille suffisamment petite pour que les caractéristiques auxquelles on s'intéresse puissent effectivement être mesurées sur tous les sujets qui le composent. Ainsi, l'échantillonnage permet de comprendre ce qui se passe dans une population sans avoir à interroger chacun des individus, ce qui semble pratique et économique. Puisqu'il est impossible de travailler sur toute la population dans son ensemble, on est contraint d'interpoler et/ou extrapoler les résultats observés sur les échantillons à l'ensemble de la population, ce qui nous amène à parler d'estimation. Estimer, c'est donner une «fourchette», une valeur inférieure et une autre valeur supérieure constituant un intervalle qui a une probabilité fixée par l'expérimentateur de contenir la valeur théorique. Ceci signifie que pour une valeur de probabilité $P = 0,05$, si l'on calcule les intervalles de confiance pour un paramètre à partir de n échantillons différents, alors 95 % des intervalles contiendraient la vraie valeur alors que pour 5 % d'entre eux, la vraie valeur se situerait à l'extérieur de l'intervalle ainsi déterminé. Pour que l'estimation soit fiable, elle doit avoir été effectuée à partir d'un échantillon représentatif de la population et doit être d'une taille garantissant une précision de l'estimation. En effet, la taille de l'échantillon conditionne la précision de l'estimation. Plus la taille augmente, plus l'estimation du paramètre par intervalle est précise. Autrement dit, plus le nombre d'échantillons est faible, plus l'erreur est élevée sur les paramètres estimés (ex: la moyenne).

Tout système d'échantillonnage utilisé pour obtenir des estimations de certaines propriétés d'une population étudiée peut et doit être évalué pour la qualité des estimations obtenues. Ainsi, un système d'échantillonnage complexe et intensif peut donner une estimation éloignée de la vraie valeur alors qu'un système simple classique pourrait donner une estimation très proche de la vraie valeur. Dans le cas de la présente étude, les échantillons ont été prélevés selon un dispositif d'échantillonnage systématique à l'aide d'une grille non alignée de 30 m x 30 m, soit une densité d'échantillonnage moyenne de 11 échantillons par ha, pour l'ensemble des trois parcelles contiguës. L'avantage de cette stratégie d'échantillonnage est qu'elle assure une bonne distribution spatiale et équilibrée des échantillons dans le champ et par conséquent,

permet l'application des statistiques à relation spatiale (Nolin et Caillier, 1992 c; Matheron, 1967). L'objectif de ce chapitre est d'étudier dans un premier temps l'impact de l'interpolation (krigeage simple) et de l'interpolation soutenue par des variables auxiliaires (co-krigeage) sur la réduction du nombre d'échantillons ainsi que la précision de l'erreur. Il a été clairement démontré dans le chapitre précédent que l'approche anisotrope était plus efficace que l'approche isotrope pour réduire l'erreur d'interpolation tant par krigeage que co-krigeage.

5.1 Variabilité intraparcellaire et stratégie d'échantillonnage dans les champs agricoles

Un objectif très fréquent des méthodes statistiques classiques est de déterminer le nombre d'échantillons nécessaires pour obtenir la valeur moyenne d'une caractéristique avec un niveau de confiance donné (Beckett et Webster, 1971; Wilding et Drees, 1983); Nolin *et al.*, 1991, 1997). Pour obtenir la moyenne des indicateurs pédologiques de la CFP à l'échelle de la parcelle ou de zones homogènes de sols à l'intérieur des parcelles, et pour évaluer l'effet de la variabilité sur les interprétations qui en découlent, il convient normalement d'utiliser un intervalle de confiance avec une probabilité de 90 % (Soil Conservation Services, 1983). Nolin *et al.* (1997) estiment qu'un grand nombre d'échantillons est généralement requis pour satisfaire ce seuil de probabilité. Or, la stratégie d'échantillonnage généralement recommandée en agriculture de précision (Wollenhaupt et Wolkowski, 1994) consiste à prendre un seul échantillon (parfois plus) par hectare. Au Québec, cet unique échantillon composite est généralement constitué à partir de quatre sous-échantillons prélevés à l'aide d'une tarière hollandaise (2,5 cm de rayon; aire totale: 0.00785 m^2) distribuée équitablement dans une aire de 1,5 m de rayon, soit d'environ $7,09 \text{ m}^2$), qui est la dimension moyenne du pèdon. Ceci correspond donc à un rapport échantillon / population de 1 sur 900 à l'intérieur du pèdon. Chaque pèdon utilisé pour l'échantillonnage est géoréférencé à l'aide du GPS afin d'en connaître les coordonnées géographiques exactes (Nolin *et al.* 1997). Utiliser une densité d'échantillonnage de 1 pèdon par ha consiste en fait à caractériser un champ agricole d'une superficie de 15 ha ($150\,000 \text{ m}^2$) à partir de 15 points d'échantillonnage (pèdons) couvrant une superficie totale de 106 m^2 soit un rapport pèdon / population de 1 sur 1415 et un rapport échantillon / population de 1 sur 1 273 237 à l'intérieur de la parcelle. La taille réelle de

l'échantillon est donc très faible par rapport à la population, d'où l'importance de s'assurer de la représentativité de tous les échantillons et sous échantillons prélevés.

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que Al_{M-3} est l'indicateur présentant le plus d'intérêt pour évaluer la capacité de fixation du phosphore des sols agricoles tant sur le plan agronomique que cartographique. Cependant, la fiabilité de la prédiction de cet indicateur repose sur le nombre et la qualité des échantillons prélevés dans les trois champs du microbassin versant du Bras d'Henri. Les résultats d'interpolation simple (krigeage) de Al_{M-3} et ceux obtenus par usage de variables auxiliaires (co-krigeage) nous permettent d'étudier dans chaque cas (cas du krigeage simple et du co-krigeage) l'impact de la taille de l'échantillon sur la précision de l'estimation. Dans chacun des cas, nous analyserons l'erreur de l'interpolation (erreur de krigeage et erreur de co-krigeage) en fonction de la taille de l'échantillon et de la densité d'échantillonnage. Nous décrirons par ailleurs la variabilité qui existe dans les résultats (moyenne et écart-type de trois essais ou piges).

5.2 Krigeage simple

Approche isotrope

Les résultats obtenus varient d'une pige à l'autre d'une part. D'autre part, on constate au tableau 19 que l'erreur standard moyenne (ESM) obtenue pour 75 % de la grille (298 mg kg^{-1}) est plus élevée que ESM obtenue pour 66 % (286 mg kg^{-1}) de la grille de même que ESM pour 50 % de la grille (317 mg kg^{-1}) est également plus élevée que ESM pour 33% de la grille (305 mg kg^{-1}). Or, en théorie, ESM devrait être plus faible pour une densité plus forte. Autrement dit, ESM pour 75 % de la grille doit être inférieure à ESM pour 66 % de la grille. Cette variabilité de résultats est également observée pour l'erreur quadratique moyenne (RMS), pour chaque essai, tel que qu'exprimée par la moyenne des essais et l'écart-type (Tableau 20). Cette variabilité des résultats peut s'expliquer par une répartition ou une disposition spatiale des échantillons qui ferait que l'erreur associée à l'interpolation des points pour une grille contenant 75% du total (298 mg kg^{-1}) des points serait plus élevée à celle ayant 66 % du total (286 mg kg^{-1}) des points. Malgré une densité plus faible de la grille de 66%, la représentativité des échantillons serait d'une qualité supérieure à celle de la grille de 75 %. Ainsi, à partir du point d'inflexion de la courbe (Figure 29), la taille minimale de l'échantillon à partir de laquelle ESM ne varie plus significativement est de 82 et la densité équivalente est de 5,2 échantillons

par ha. L'interpolation par krigeage simple isotrope de l'indicateur Al_{M-3} servira de référence pour évaluer l'impact de la réduction de la taille et de la densité de l'échantillon sur la précision de l'estimation en termes d'erreur d'interpolation selon différentes stratégies d'interpolation par co-krigeage. Pour cette approche, la densité optimale d'échantillonnage dans les champs à l'étude est donc de 5,2 échantillons par ha.

Tableau 20 : Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) d'interpolation par krigeage simple de Al_{M-3} en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	265	254	----	----	----	----	265	254	----	----
123	75	7,8	298	280	274	247	267	267	280	265	16	17
109	66	7,0	286	277	260	247	264	288	270	271	14	21
82	50	5,2	317	328	241	276	273	239	277	281	38	45
55	33	3,5	305	328	322	299	332	289	320	305	14	20
41	25	2,6	367	319	348	290	394	417	370	342	23	67
33	20	2,1	401	404	466	402	316	276	394	361	75	73
28	17	1,8	391	299	316	285	381	378	363	321	41	50
24	15	1,5	342	298	344	280	477	424	388	334	77	78
21	13	1,3	446	366	344	335	524	517	438	406	90	97

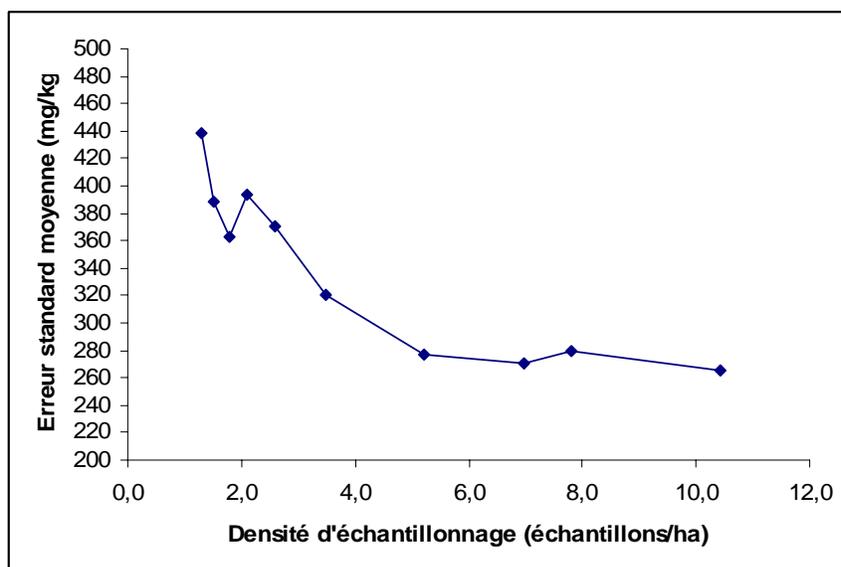


Figure 29 : Variation de l'erreur standard.moyenne (ESM) selon la densité d'échantillonnage et la taille de l'échantillon pour une interpolation par krigeage simple (approche isotrope).

Approche anisotrope

Les résultats obtenus en krigeage simple anisotrope, montrent moins de variabilité au niveau de l'erreur standard moyenne par rapport au pourcentage de la grille. On observe quand même pour le premier essai une ESM plus élevée (280 mg kg^{-1}) pour 75 % de la grille et une ESM plus faible pour 66 % de la grille (254 mg kg^{-1}). Dans le deuxième essai, on retrouve cette variabilité. Les ESM obtenues pour 50 % de la grille (227 mg kg^{-1}) et pour 66 % de la grille sont toutes plus faibles que celles obtenues pour 75% de la grille (260 mg kg^{-1}). De plus, l'ESM obtenue pour 17 % (285 mg kg^{-1}) de la grille est légèrement inférieure à l'ESM pour 33 % de la grille (287 mg kg^{-1}). Dans le troisième essai, c'est à 50 % de la grille (ESM= 222 mg kg^{-1}) et c'est à 20 % de la grille, (ESM= 254 mg kg^{-1}) qu'on observe la variabilité des erreurs liées à la densité et à la taille de l'échantillon. Toute la variabilité des erreurs des différents essais se reflète au niveau des moyennes des ESM, au niveau des RSM et au niveau des écart-types des piges. Ainsi, on constate que ESM pour 50 % de la grille (248 mg kg^{-1}) est plus faible que ESM obtenue à 66 % de la grille (257 mg kg^{-1}) et de 75 % de la grille (267 mg kg^{-1}) et que ESM à 20 % de la grille (305 mg kg^{-1}) est plus faible que ESM à 25 % de la grille (321 mg kg^{-1}). Cette variabilité épouse la même explication que celle donnée précédemment dans le cas d'un

krigeage simple en isotropie, c'est à dire que cette variabilité peut s'expliquer par la distribution spatiale des points qui ferait en sorte que l'interpolation d'une faible taille de population d'échantillon donnerait une meilleure représentativité des échantillons de la grille en fonction de la qualité de ces points à contenir l'information relative à l'indice de la CFP (Al_{M-3}). À partir du point d'inflexion de la courbe; on peut dire que la taille minimale de l'échantillon à partir de laquelle ESM ne varie plus significativement est ($x = 82$) et la densité équivalente est de 5,2. L'erreur correspondant est de 248 mg kg⁻¹. Cependant, pour cette approche en anisotropie, l'ESM associée à 100 % de la grille est de 253 mg kg⁻¹ par rapport à une ESM de 265 mg kg⁻¹ dans le cas de l'isotropie (Tableau 21). La précision de l'estimation de l'indicateur Al_{M-3} par rapport à la réduction de la taille de l'échantillon lors d'une interpolation simple par anisotropie est fiable et semble de qualité en comparaison par l'approche isotrope.

Tableau 21 : Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) d'interpolation par krigeage simple de Al_{M-3} en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	253	236	---	----	----	----	253	236	----	----
123	75	7,8	280	262	260	226	260	239	267	242	19	18
109	66	7,0	254	262	249	235	269	234	257	244	14	16
82	50	5,2	296	282	227	256	222	269	248	269	32	13
55	33	3,5	312	313	287	270	299	244	299	276	16	35
41	25	2,6	325	249	320	270	317	310	321	276	22	31
33	20	2,1	346	359	314	249	254	229	305	279	44	70
28	17	1,8	317	285	285	282	368	349	323	305	42	38
24	15	1,5	326	309	308	267	445	414	360	330	82	76
21	13	1,3	389	328	325	279	461	399	392	335	81	60

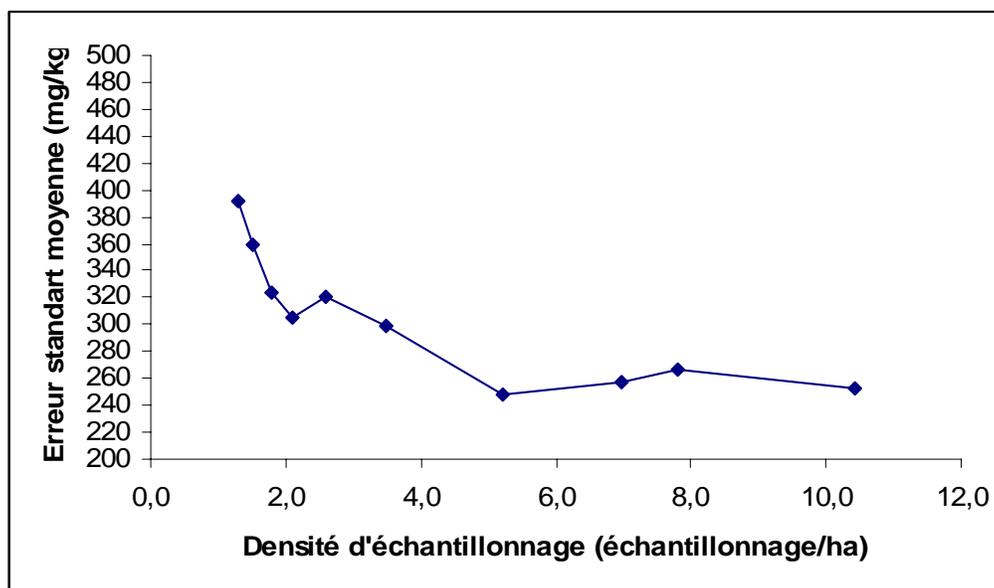


Figure 30 : Variation de l'erreur standard.moyenne (ESM) selon la densité d'échantillonnage et la taille de l'échantillon pour une interpolation par krigeage (approche anisotrope).

5.3 Co-krigeage

5.3.1 Cas du Geonics EM-38 (CEA à 130 cm)

Approche isotrope

Les résultats d'une interpolation de l'indicateur Al_{M-3} soutenue par des données de la conductivité électrique à 130 cm de la surface du sol montre qu'à 100% de la densité d'échantillonnage, l'erreur associée à l'interpolation est beaucoup plus faible (215 mg kg^{-1}). On observe une variabilité dans les résultats de co-krigeage en isotropie. On peut noter une faible ESM de 160 mg kg^{-1} pour 17 % de la grille et une ESM de 167 mg kg^{-1} pour 13 % de la grille pour le premier essai. Dans la moyenne des ESM, cette variabilité s'observe à 50 % de la grille pour une densité de 5.2 avec une ESM 215 mg kg^{-1} et une ESM de 217 mg kg^{-1} à 66 % de la grille alors que pour 75 % de la grille on observe une ESM de 222 mg kg^{-1} . Une précision de de l'estimation est obtenue pour une taille de 82 échantillons correspondant à une densité 5,2 et 50 % de la grille (Tableau 21). La distribution spatiale des points et la représentativité de la qualité de certains points parmi la grille expliqueraient encore une fois la variabilité des ESM.

L'usage de la CEA à 130 cm fait baisser l'erreur d'interpolation de Al_{M-3} et par surcroît une fiabilité du cokrigeage à l'aide de variable auxiliaire comme la CEA en comparaison au krigeage simple de cet indicateur. Pour la densité d'échantillonnage, le point d'inflexion se situe à ($x= 5.2$ et $y= 215 \text{ mg kg}^{-1}$) et pour une taille minimum de ($n= 82$).

Tableau 22 : Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la conductivité électrique apparente mesurée à 130 cm avec le Geonics EM-38 en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité $n \text{ ha}^{-1}$	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	215	208	----	----	----	----	215	208	----	----
123	75	7,8	243	222	230	204	193	205	222	210	26	10
109	66	7,0	223	225	184	197	243	208	217	210	30	14
82	50	5,2	223	228	233	214	190	190	215	211	23	19
55	33	3,5	218	213	252	217	251	230	240	220	19	9
41	25	2,6	245	224	262	239	253	228	253	230	9	8
33	20	2,1	343	228	284	227	262	234	296	230	42	4
28	17	1,8	160	260	272	268	292	185	241	238	71	46
24	15	1,5	262	234	327	252	306	255	298	247	33	11
21	13	1,3	167	205	330	283	238	278	245	255	82	44

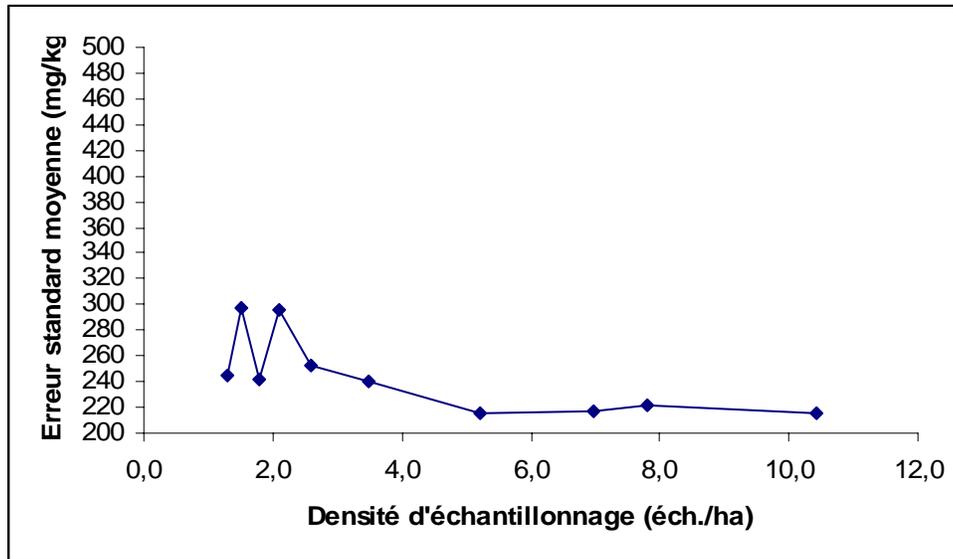


Figure 31 : Variation de l'erreur standard.moyenne (ESM) selon la densité d'échantillonnage et la taille de l'échantillon pour une interpolation par co-krigeage avec la CEA mesurée avec le Geonics EM-38 à 130 cm (approche isotrope).

Approche anisotrope

Les résultats de l'interpolation soutenue (co-krigeage) de la CEA à 130 cm montrent une variabilité dans les erreurs ponctuelles pour chaque essai et pour la moyenne des essais. Cette observation est également vraie pour les valeurs d'écart type. Par exemple, on constate que pour la grille de 66 % la valeur d'ESM (248 mg kg⁻¹) est inférieure à la valeur d'ESM de la grille de 75 % (270 mg kg⁻¹). Ce constat est pareil pour la pige 2 et 3 et la moyenne des piges où respectivement pour 66 % et pour 75 % de la grille 210 mg kg⁻¹ est < à 251 mg kg⁻¹, 210 mg kg⁻¹ < 253 mg kg⁻¹ et 223 mg kg⁻¹ < 258 mg kg⁻¹ (Tableau 23). Cette variabilité peut s'expliquer une fois encore par la répartition spatiale des points. Cette répartition spatiale serait d'une meilleure qualité d'une grille à l'autre quant à la représentativité des points par rapport à l'indicateur Al_{M-3}. La réduction de la taille de l'échantillon par cette approche anisotrope ne donne pas une meilleure précision de l'estimation de l'indicateur Al_{M-3} par rapport à l'approche isotrope de cokrigeage par la CEA à 130 cm.

Tableau 23 : Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la conductivité électrique apparente mesurée à 130 cm avec le Geonics EM-38 en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).

Densité d'échantillonnage			Page 1		Page 2		Page 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité $n \text{ ha}^{-1}$	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	246	211	----	----	----	----	246	211	----	----
123	75	7,8	270	229	251	207	253	207	258	214	10	13
109	66	7,0	248	229	210	192	210	254	223	225	22	31
82	50	5,2	286	229	244	210	261	202	264	214	21	14
55	33	3,5	235	207	244	210	243	218	241	212	5	6
41	25	2,6	245	221	250	224	212	210	236	218	21	7
33	20	2,1	320	231	221	258	223	193	255	227	57	33
28	17	1,8	305	210	261	272	345	228	304	237	42	33
24	15	1,5	365	307	300	278	401	288	355	291	51	32
21	13	1,3	397	265	286	292	345	216	343	258	56	15

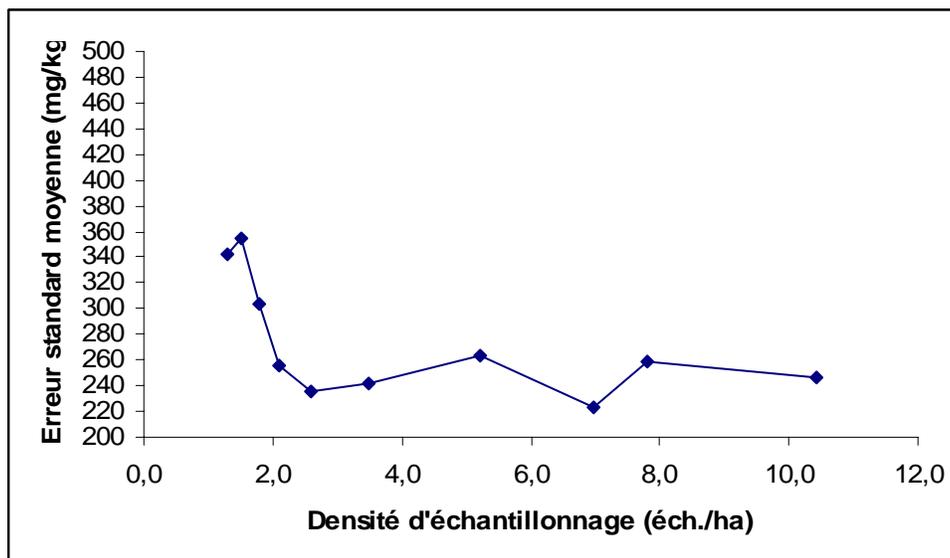


Figure 32 : Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) selon la densité d'échantillonnage et la taille de l'échantillon pour une interpolation par co-krigeage avec la CEA mesurée avec le Geonics EM-38 à 130 cm (approche anisotrope).

5.4 Discussion et conclusion

À l'issue de ces différentes analyses des stratégies d'interpolation soutenue par des variables auxiliaires, il convient de dire que, quelque soit l'approche utilisée (isotrope ou anisotrope), il y a une variabilité dans les résultats pour chaque variable auxiliaire utilisée en co-krigeage (voir les tableaux en annexe), en particulier pour les faibles densités d'échantillonnage. L'analyse des moyennes et des écart-types des erreurs (ESM et RMS) obtenus par co-krigeage à partir de tous les variables auxiliaires montre que l'erreur de prédiction est plus élevée lorsque la densité est faible. En somme, la plus faible erreur d'interpolation soutenue a été obtenue avec les données du Geonics EM-38 (215 mg kg^{-1}). Pour l'ensemble des données, la taille minimale d'échantillon ($n= 82$) pour atteindre le point d'inflexion correspondant à une densité de 5,2 échantillons par ha (la norme exigée par l'industrie étant de 1 échantillon par ha.). Cette densité est comparable à celle obtenue par Nolin et Leclerc (2001) dans les sols de l'île d'Orleans (Québec) pour des conditions pédologiques identiques aux nôtres. Cette étude démontre que le nombre d'échantillons requis pour soutenir la cartographie numérique de la CFP est trop élevée (5,2 échantillons par ha) relativement à la précision obtenue ($200\text{-}300 \text{ mg Al}_{\text{M-3}} \text{ kg}^{-1}$) (Tableau 24) pour la plupart des productions agricoles du Québec.

Tableau 24 : Bilan de l'étude de la stratégie d'échantillonnage selon diverses stratégies d'interpolation spatiale de Al_{M-3} , indicateur de la CFP.

Variable auxiliaire	Approche d'interpolation	Valeur moyenne ESM (mg/kg) pour trois densités d'échantillonnage 1, 3 éch./ ha; 5,2 éch./ha; 10,4 éch./ha
Geonics EM-38	isotropie	225
	anisotropie	284
Veris 3100 (100cm)	isotropie	227
	anisotropie	305
Veris 3100 (30cm)	isotropie	331
	anisotropie	298
Image AM (bande 1)	isotropie	289
	anisotropie	317
Image AM (bande 2)	isotropie	299
	anisotropie	291
IKONOS bande 1	isotropie	331
	anisotropie	311
IKONOS bande 2	isotropie	336
	anisotropie	309
IKONOS bande 3	isotropie	425
	anisotropie	321
IKONOS bande 4	isotropie	351
	anisotropie	325

Le co-krigeage s'avère malgré tout une approche d'interpolation nécessaire car il permet de diminuer le nombre d'échantillons et permet par la même occasion d'avoir une meilleure précision. Cependant, par rapport à la gestion du phosphore à l'aide de l'indicateur de la CFP, Al_{M-3} , il est nécessaire de recourir à une approche alternative à celle basée sur la cartographie numérique de la CFP et requérant une moins grande densité d'échantillonnage. Cette approche, qui permettrait de mieux gérer les intrants à base de phosphore, est celle des zones d'aménagement ayant des caractéristiques pédologiques et de CFP identiques. Ces zones pourront ainsi être gérées selon leur capacité de fixation du P. La stratégie de délimitation de ces zones d'aménagement fera l'objet du prochain chapitre.

6. LES ZONES D'AMÉNAGEMENT

Le concept d'agriculture de précision est un mode de gestion des terres visant à cultiver ou exploiter de façon spécifique les sols. Il est aussi basé sur la caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés de sols. Une autre approche basée sur la gestion des cultures spécifiques à un site (GCSS) permet d'atteindre un certain équilibre entre le potentiel (éléments minéraux) du site (le sol) et les cultures qui y poussent. Ce concept de (GCSS) est aussi basé sur la présence de structure d'organisation spatiale des sols.

Dans les chapitres précédents, il a été montré que la CFP des sols présentait des structures d'organisation spatiale dans les trois champs étudiés, ce qui a permis de réaliser une cartographie par krigeage de la continuité spatiale des quatre indicateurs utilisés (Al_{M-3} , $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$, $Fe_{ox}+Al_{ox}$ et PSI). Il a aussi été démontré que la CFP présentait des relations spatiales avec quelques variables auxiliaires étudiées permettant de réduire l'erreur d'interpolation en utilisant la technique de co-krigeage pour l'indicateur de la CFP montrant la structure spatiale la mieux définie (Al_{M-3}) et aussi de réduire le nombre d'échantillons requis pour atteindre une précision donnée (5-6 échantillons). Cependant, malgré la diminution du nombre d'échantillons requis, l'interpolation soutenue (co-krigeage) ne permet pas d'atteindre une précision de l'estimation de Al_{M-3} satisfaisante (environ une demie classe, soit 250 mg kg^{-1} , selon le guide de fertilisation du CRAAQ, 2003) pour justifier une gestion précise sur une base continue du P ainsi que l'épandage du fumier et lisier à l'aide de technologies d'application à taux variables. La précision obtenue, dépendante de la distribution spatiale des points par rapport à la représentativité des échantillons montre les limites de cette méthode dans le contexte agro-pédologique du Québec où les parcelles sont longues et étroites et présentent souvent une diversité pédologique élevée. Une alternative entre la gestion continue et la gestion uniforme des intrants à l'intérieur d'une parcelle consiste à gérer les intrants par zones de sols aux caractéristiques et comportements homogènes, lesquelles constituent les zones d'aménagement (ZA). La stratification des parcelles agricoles en ZA permet en effet de réduire la variabilité intra champ des facteurs influençant le rendement et la qualité des cultures.

Le but de ce chapitre est de réaliser la cartographie des indicateurs de la CFP, plus particulièrement Al_{M-3} , par zones d'aménagement (Fridgen *et al.*, 2000) lesquelles seront délimitées à partir de variables auxiliaires (Figure 29), soit les mesures de la CEA acquises avec

le VERIS 3100 et le Geonics EM-38, les données d'élévation issues du MNE et les informations spectrales extraites de l'image IKONOS (quatre bandes spectrales ainsi que l'indice de végétation ajusté à la droite de sol (SAVI)). L'objectif de la stratification de l'ensemble des trois champs agricoles en ZA est de minimiser la variance des quatre indicateurs de la CFP (Al_{M-3} , $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$, $Al_{ox}+Fe_{ox}$ et PSI) et de générer des ZA qui soient significativement différentes les unes des autres en regard de leur CFP et des propriétés associées. Le logiciel MZA de l'université Missouri (Fridgen *et al.*, 2004) sera utilisé pour réaliser la stratification. La première étape consistera à déterminer le nombre optimum de ZA à considérer. La suivante sera d'évaluer l'efficacité des différentes variables auxiliaires dans le processus de stratification des parcelles. L'analyse portera sur les indices IFP et NCE calculés par le logiciel MZA ainsi que sur les graphiques de réduction de la variance des variables auxiliaires et des indicateurs de la CFP, associée à la stratification des parcelles en ZA. Enfin, une analyse de variance et un test de comparaison multiple (Scheffe) permettront d'évaluer si les ZA délimitées sont significativement différentes les unes des autres quant à leur CFP et autres propriétés associées.

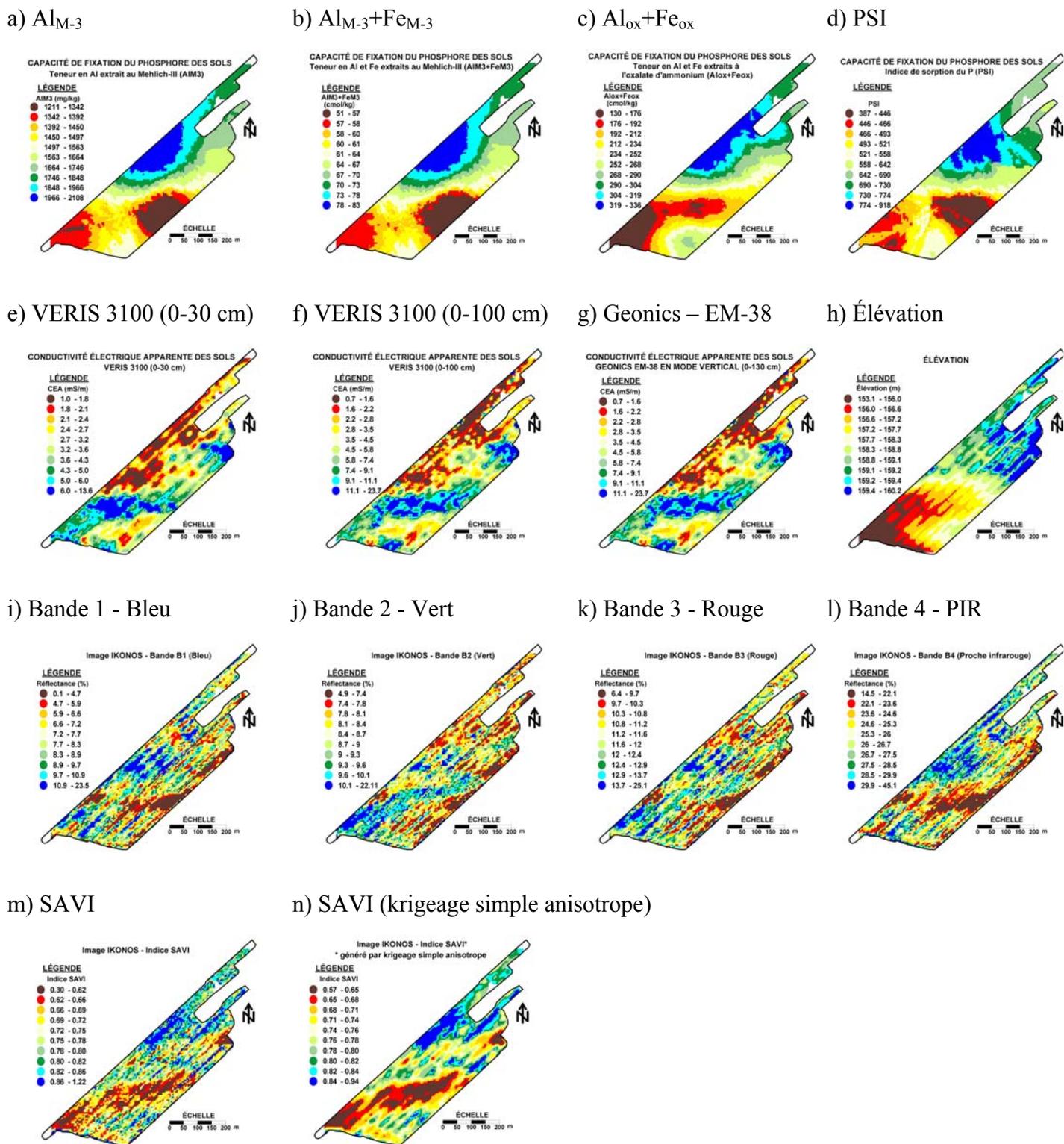


Figure 33 : Cartes des variables utilisées comme intrants au logiciel MZA pour la stratification des parcelles en zones d'aménagements.

6.1 Détermination du nombre optimum de zones d'aménagement dans les trois champs agricoles du bassin versant du Bras d'Henri

Pour illustrer les résultats générés avec le logiciel MZA, des données de sols de trois champs agricoles du bassin versant de la rivière Bras d'Henri ont été utilisées pour créer et évaluer l'utilité de potentielles zones d'aménagement. Le nombre de zones d'aménagement à prendre en compte à l'intérieur des champs est fonction de la variabilité naturelle présente dans l'ensemble des champs.

Le choix du nombre optimum de zones n'est pas préalablement établi dans la classification non dirigée par la méthode de groupement flou à k moyennes utilisées dans le logiciel MZA. Il doit être déterminé par analyse des indices de performance fournis par le logiciel : FPI et NCE. Le critère FPI fournit une mesure de la ségrégation obtenue par la stratification tandis que NCE est un indicateur du degré de désorganisation des cellules dans l'espace. Ces deux critères doivent être minimales pour obtenir une stratification efficiente. La détermination du nombre optimal de zones d'aménagement est aussi et surtout basée sur l'analyse de la réduction partielle de variance relative (RV) des variables auxiliaires utilisées pour la stratification par rapport à la variance totale présente à l'intérieur du territoire étudié (Fridgen *et al.* 2000). La RV des variables d'intérêt (Al_{M-3} , $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$, $Al_{ox}+Fe_{ox}$ et PSI), doit être maximale pour obtenir une stratification efficiente. Ainsi,

$$RV = \sum_{i=1}^C \sum_{j \in zoneZ} (x_{ij} - \mu_i)^2 / \sum_{j \in champ} (x_j - \mu)^2 \quad (12)$$

où Z est le nombre total de zones, x_{ij} une observation de la variable dans la zone i , (ici un indicateur de la CFP ou encore une variable auxiliaire utilisée comme stratificateur), x_j une observation de la variable dans l'ensemble du champ, μ_i la moyenne de la variable (de l'indicateur ou du stratificateur) dans la zone i et μ la moyenne dans l'ensemble du champ (de l'indicateur ou du stratificateur). Au fur et à mesure que le nombre de zones augmente, généralement RV diminue puis se stabilise. Le nombre de zones où la RV est maximale et s'accompagne d'une stabilité de la variance avec l'accroissement du nombre de ZA (point d'inflexion de la courbe), correspond au nombre optimal de zones à considérer.

Les critères de FPI et NCE peuvent aussi être utilisés pour choisir la meilleure stratégie de stratification, i.e. la meilleure combinaison de variables auxiliaires à utiliser pour la stratification. La stratégie qui obtiendra les plus faibles valeurs de FPI et NCE sera jugée la meilleure. Pour cela, nous avons classé ces indices selon que la stratification est faite à partir de l'image IKONOS (télédétection) ou à partir de la CEA (senseur au sol). Il est à noter que dans toutes les combinaisons de variables auxiliaires étudiées, la mesure d'élévation extraite du MNE a toujours été associée aux autres variables auxiliaires car cette mesure est fort utile pour guider les travaux d'aménagement hydraulique (drainage de surface) et de conservation des sols. De plus, l'intégration de cette mesure dans le processus de classification permettait d'imposer une certaine contrainte de contiguïté spatiale, effet recherché pour obtenir des zones compactes à superficie suffisamment importante pour justifier une gestion spécifique des intrants et un échantillonnage représentatif.

L'analyse des graphiques présentés aux figures 30 et 31 montre que selon ces deux indices de performance, le nombre de zones à considérer pour l'échantillonnage des sols et la gestion spécifique des cultures, varie selon la stratégie de stratification étudiée. Cependant, dans la majorité des cas, c'est trois zones qu'il conviendrait de choisir pour gérer la variabilité spatiale des sols présente dans ces parcelles.

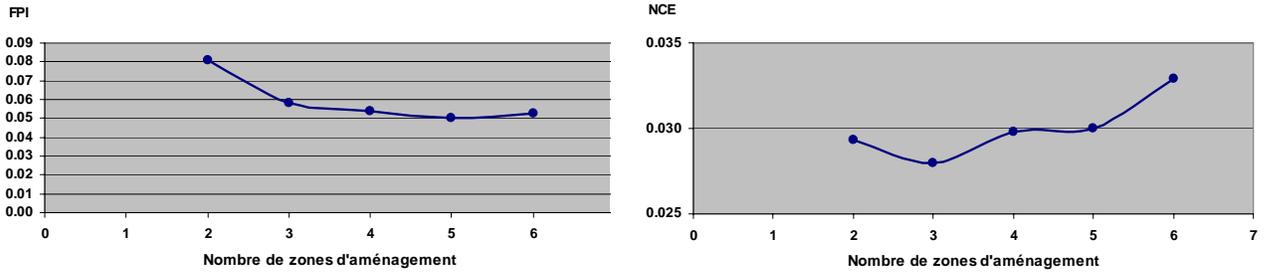
Ainsi, on obtient trois zones d'aménagement dans le cas de la CEA mesurée avec le Geonics EM-38 à 130 cm du sol (Figure 30a-b) tandis que la stratification avec la CEA mesurée avec le VERIS 3100 à 30 cm (Figure 30c-d) propose quatre zones. On obtient également trois zones avec la CEA mesurée avec le VERIS 3100 à une profondeur de 0-100 cm (Figure 30e-f). L'association des deux mesures de CEA prises avec le VERIS (0-30 cm et 0-100 cm) avec les données du MNE permet d'obtenir également quatre zones distribuées à l'intérieur des champs (Figure 30g-h). Lorsqu'on choisit les quatre bandes de l'image IKONOS (bleu, vert, rouge et proche infra rouge) comme stratificateurs, on obtient deux zones d'aménagement. On obtient un résultat semblable en utilisant uniquement la bande du proche infra rouge, l'information spectrale présentant la corrélation la plus élevée avec les indicateurs de la CFP. L'indice spectral de végétation ajusté aux sols (SAVI) et l'indice SAVI généré par interpolation (krigeage simple) donne trois zones d'aménagement chacun. En se basant sur le critère NCE (degré de désorganisation), on retient deux à trois zones selon la stratégie de stratification étudiée. Dans le plupart des cas, le degré de désorganisation augmente au-delà de trois ZA.

Quelque soit la stratégie utilisée, l'efficacité de la stratification est très bonne car les valeurs s'approchent de zéro pour les deux critères (FPI= 0.05-0.16 et NCE = 0.02-0.07). Les valeurs les plus élevées ont été obtenues en utilisant l'ensemble des bandes spectrales de l'image IKONOS et les valeurs les plus faibles en stratifiant les parcelles avec les mesures de CEA, en particulier le VERIS 3100 (0-30 cm).

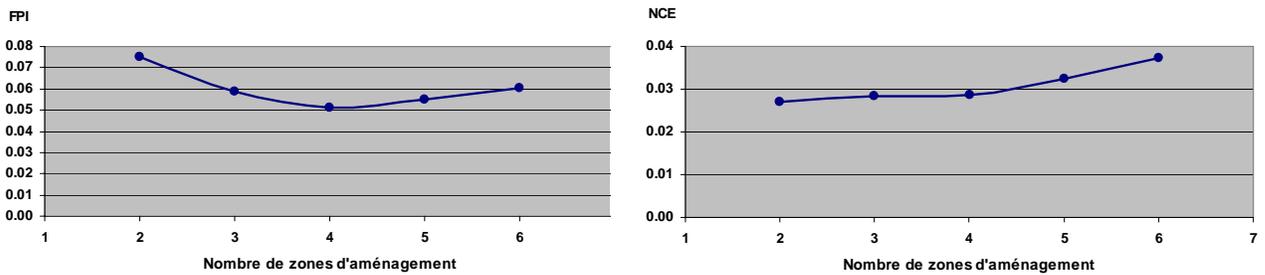
FPI

NCE

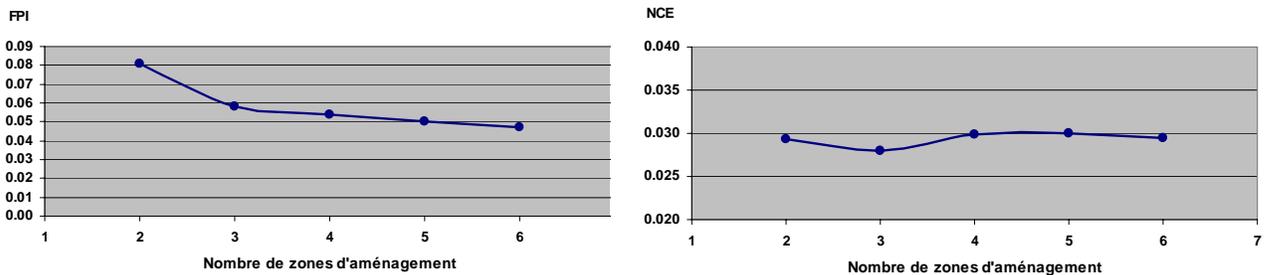
a-b) Stratificateurs : Élévation et conductivité électrique apparente mesurée avec le Geonics EM-38 (0-130 cm)



c-d) Stratificateurs : Élévation et conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS 3100 (0-30 cm)



e-f) Stratificateurs : Données d'élévation et de conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS 3100 (0-100 cm)



g-h) Stratificateurs : Élévation et conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS 3100 (0-30 cm et 0-100 cm)

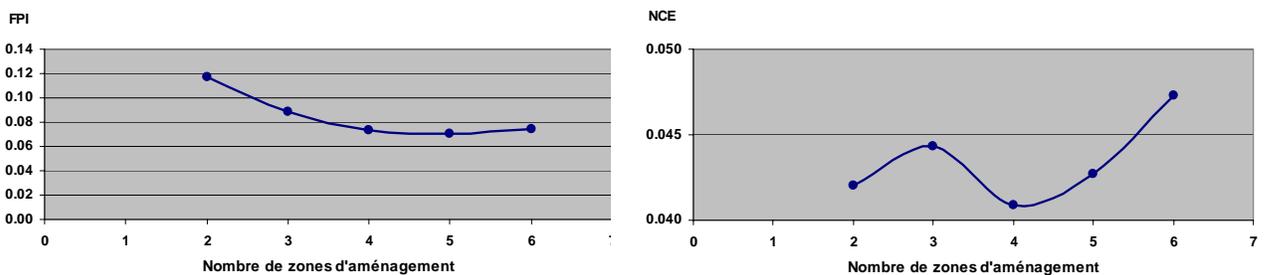
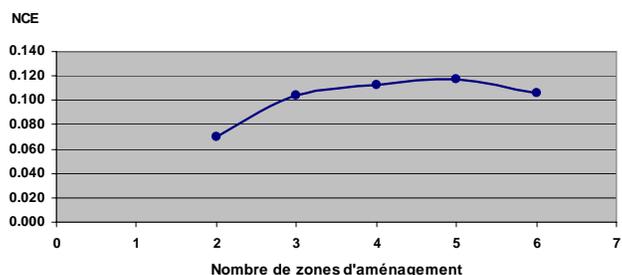
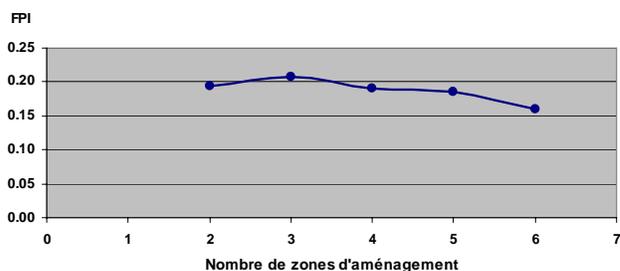


Figure 34 : Variation des indices de performance de la stratification des parcelles (FPI et NCE) selon le nombre de zones d'aménagement délimitées à partir des données d'élévation de haute précision (DGPS-RTK) et de conductivité électrique apparente des sols acquises avec le Geonics EM-38 ou le VERIS 3100.

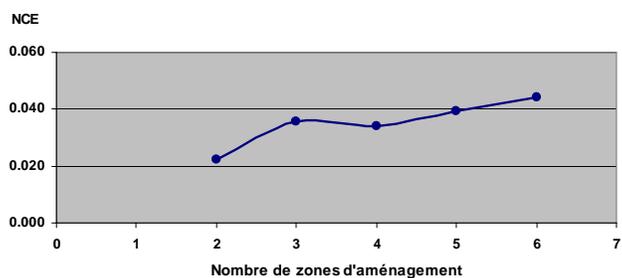
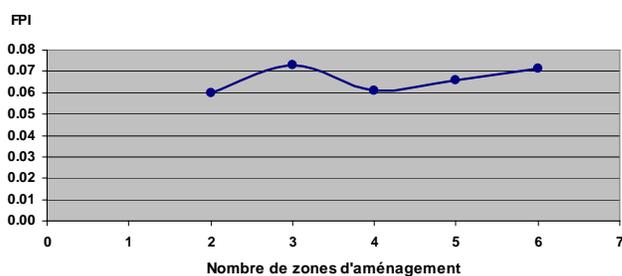
FPI

NCE

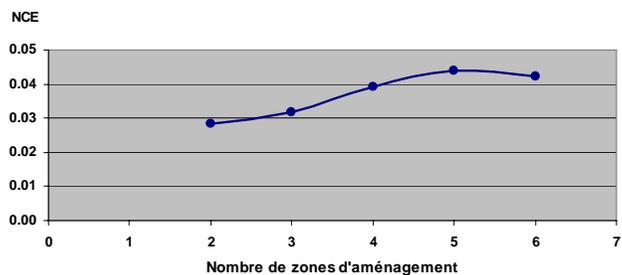
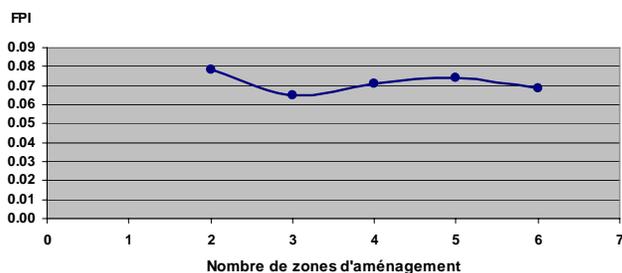
a-b) Stratificateurs : Élévation et bandes 1 à 4 (bleu, vert, rouge et proche-infrarouge) d'une image IKONOS



c-d) Stratificateurs : Élévation et bande 4 (proche-infrarouge) d'une image IKONOS



e-f) Stratificateurs : Élévation et indice SAVI calculé directement à partir d'une image IKONOS



g-h) Stratificateurs : Élévation et indice SAVI généré par krigeage simple anisotrope à partir d'une image IKONOS

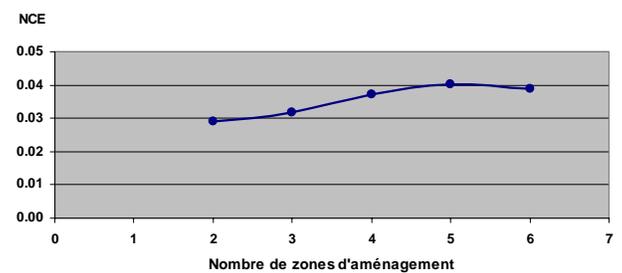
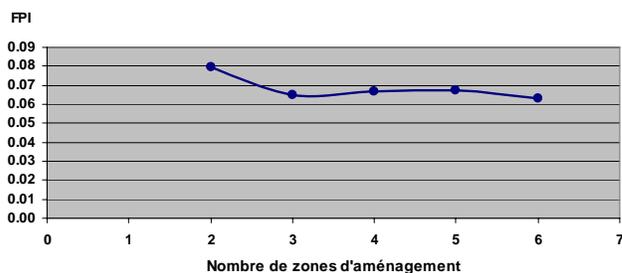


Figure 35 : Variation des indices de performance de la stratification des parcelles (FPI et NCE) selon le nombre de zones d'aménagement délimitées à partir des données d'élévation de haute précision (DGPS-RTK) et des informations multispectrales obtenues à partir d'une image IKONOS acquise au printemps 2008.

Lorsque l'on considère la RV des variables auxiliaires lors de la stratification des parcelles avec la CEA mesurée à partir du Geonics EM 38 à une profondeur de 0-130 cm et les données d'élévation extraites du MNE, les graphiques indiquent que trois ZA produisent la plus grande RV pour la CEA (100-30=70%) alors que deux ZA suffisent pour obtenir la plus grande RV (75%) pour l'élévation (Figure 32). Malgré que AIM-3 a été jugé, dans les chapitres précédents, comme l'indicateur de la CFP le plus facile à cartographier, des courbes de RV ont aussi été réalisées pour les autres indicateurs de la CFP, soit: Alox+Feox, AIM-3+FeM-3 et PSI. C'est pour l'indicateur Alox+Feox que la plus grande RV a été obtenue (60-80%) alors qu'elle se limite à 40-50% pour AIM-3 et AIM-3+FeM-3. Une telle RV pour Alox+Feox peut s'expliquer par le fait que cet indicateur est étroitement associé à la genèse des sols (Schwertmann, 1993). En effet, il a déjà été utilisé comme critère de classification des podzols dans le système canadien de classification des sols (McKeague, 1967, Bernier et Carrier, 1968, Baril et Tran, 1977). Or, Leclerc *et al.* (2001) ainsi que Vézina *et al.* (2000) ont démontré l'importance de la classification taxonomique des sols dans la classification de la CFP des sols (podzol > brunisol > gleysol). D'autre part, plusieurs études ont montré la relation entre la CEA et la classification taxonomique des sols dans plusieurs agro-écosystèmes de l'Est du Canada (Nolin *et al.*, 2002, Liu *et al.*, 2005, Cambouris *et al.*, 2006, Leclerc *et al.*, 2006, Perron *et al.*, 2008, Liu *et al.*, 2008).

Quelque soit l'indicateur de la CFP étudié, c'est pour deux ZA que se produit la plus grande RV des quatre indicateurs de la CFP. Une RV additionnelle de 10 à 15% se produit pour cinq ZA. On peut donc établir entre deux et cinq zones, le nombre minimum et maximum de ZA à considérer dans les parcelles étudiées pour établir une stratégie de gestion spécifique des intrants par ZA.

Des résultats comparables ont été obtenus par Liu *et al.* (2008) pour les stratégies de stratification utilisant la CEA combinée à l'élévation comme stratificateurs. Ainsi, dans le cas de la stratégie utilisant la CEA mesurée avec le VERIS 3100 à une profondeur de 0-30 cm combinée à l'élévation, l'analyse de la réduction de la variance a permis de déterminer que trois zones d'aménagement produisent la RV la plus grande pour la CEA tandis que c'est plutôt avec deux zones d'aménagement qu'on obtient ce résultat pour l'élévation (Figure 33). Lorsqu'on utilise comme stratificateur la CEA mesurée avec VERIS 3100 à une profondeur de 0-100 cm et l'élévation (Figure 61), la réduction de la variance la plus grande pour la CEA est également

obtenue avec trois zones d'aménagement ainsi que deux zones pour l'élévation. En combinant les deux mesures de CEA prises avec le VERIS 3100 (0-30 et 0-100 cm) et l'élévation (Figure 35), l'observation de la réduction de la variance établit également à trois zones d'aménagement. Le nombre optimum de ZA à considérer pour les mesures de CEA (0-30 et 0-100 cm) est à deux zones pour l'élévation. Il y a donc cohérence dans les résultats utilisant la CEA quelque soient les outils utilisés pour la mesurer.

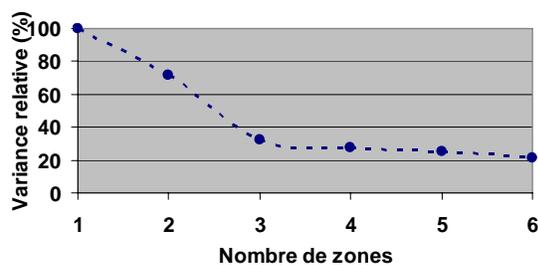
Les résultats sont un peu différents en utilisant l'ensemble de l'information spectrale extraite de l'image IKONOS. Ainsi, en utilisant comme stratificateurs, les quatre bandes (bleu, vert, rouge et proche-infrarouge) de l'image IKONOS, la RV la plus grande est obtenue pour quatre et puis six ZA pour l'ensemble des bandes spectrales (Figure 36). On obtient les mêmes résultats si on utilise uniquement le proche infrarouge, la bande spectrale présentant la corrélation la plus élevée avec les indicateurs de la CFP, combinée à l'élévation, soit un nombre minimum et maximum de quatre et six zones d'aménagement pour atteindre la RV la plus grande pour la bande du proche infrarouge et toujours deux zones pour l'élévation (Figure 37). Cependant, si on utilise comme stratificateur combiné à l'élévation, l'indice SAVI calculé à partir des valeurs de réflectance du rouge et du proche infrarouge extraites de l'image IKONOS (Figure 38) ou l'indice SAVI généré par krigeage simple en approche anisotrope (Figure 39), l'analyse du critère de réduction de la variance permet d'établir entre deux et trois, le nombre optimal de zones d'aménagement à considérer pour la RV de l'indice SAVI tout comme pour l'élévation.

Pour être utiles, les zones d'aménagement réalisées à l'aide des variables auxiliaires doivent être homogènes et contrastantes sur le plan des propriétés de sols que l'on désire échantillonner et gérer (Cambouris *et al.*, 2006), à savoir ici les indicateurs de la CFP des sols. Les variables auxiliaires qui ont une forte corrélation avec les indicateurs de la CFP sont celles qui montrent une grande réduction de variance (RV). Quelque soit la stratégie de stratification utilisée et l'indicateur de la CFP étudié, la plus grande RV des indicateurs de la CFP est obtenue pour deux zones d'aménagement. Par contre, lorsque la stratification porte sur cinq ZA, on enregistre une RV additionnelle de 10 %. La RV est la plus grande pour $Al_{ox}+Fe_{ox}$, suivi de PSI et enfin des deux indicateurs dérivés de l'extraction au Mehlich-3 (Al_{M-3} et $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$). Nolin *et al.* (2002) ont obtenu une RV d'environ 60% pour des propriétés de sols comme Mg et K pour une stratification en deux zones d'aménagement pour un champ agricole de la région de l'Estrie (Québec). Leur étude a montré qu'une stratification en trois ou quatre zones n'améliorait pas les

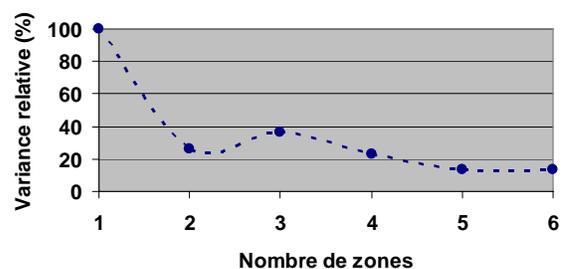
critères de RV tandis qu'une délimitation du champ en cinq zones aboutissait à une RV d'environ 20%. Dans deux champs agricoles ayant une bonne pédodiversité situés dans la région d'Ottawa (Ontario), Perron *et al.* (2008) estimaient que deux à trois zones d'aménagement semblent optimales pour bien cerner la variabilité présente dans les champs. Cette étude a montré que la RV du VERIS 3100 (0-30 cm) et du VERIS 3100 (0-100 cm) étaient respectivement de 60 et 70 % en délimitant deux zones d'aménagement et 70 à 83 % pour une segmentation en trois zones d'aménagement à partir de ces mêmes variables auxiliaires. Ces mêmes auteurs ont trouvé que la RV de certains indicateurs de fertilité (Ca, Mg, Al) était généralement plus faible (5 à 50 %) que la RV des variables auxiliaires utilisées pour la segmentation. L'utilisation de la CEA (Geonics EM-38) par Cambouris *et al.* (2006) a permis de délimiter deux zones d'aménagement optimales pour implanter dans un champ de culture de pomme de terre (St-Amable, Québec) une gestion spécifique de l'azote. Dans ce champ, les zones ainsi délimitées à partir de la CEA différaient par la profondeur du substratum au gley, laquelle affichait une RV de 35 à 64 %. Ces mêmes auteurs ont obtenu pour le contenu du sol en P une RV de 17 à 40 % pour une stratification en deux zones d'aménagement et une bonne réduction de la RV a aussi été obtenue pour le contenu du sol en K, Ca et Mg de la couche de surface.

Par ordre décroissant d'efficacité de la stratification en termes de RV des indicateurs de la CFP, on peut classer les différentes stratégies de stratification selon l'ordre suivant : VERIS 3100 (0-100 cm) > SAVI krigé > SAVI > EM 38 (0-130 cm) > VERIS 3100 (0-30 cm) > IKONOS-bande 4 : PIR > VERIS (0-30 et 0-100 cm) > IKONOS (bleu, vert, rouge, PIR).

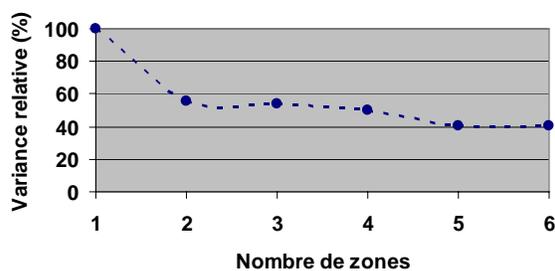
a) CEA – EM-38



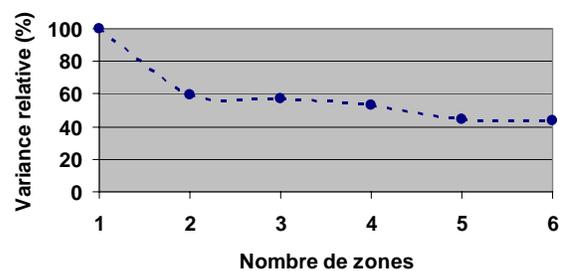
b) Élévation



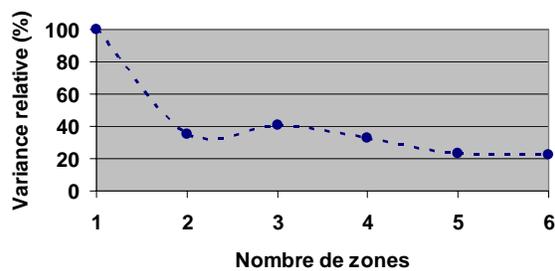
c) Al_{M-3}



d) $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$



e) $Al_{ox}+Fe_{ox}$



f) PSI

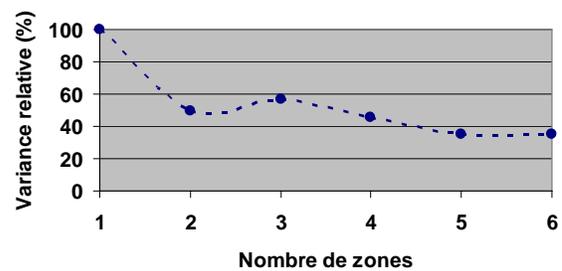
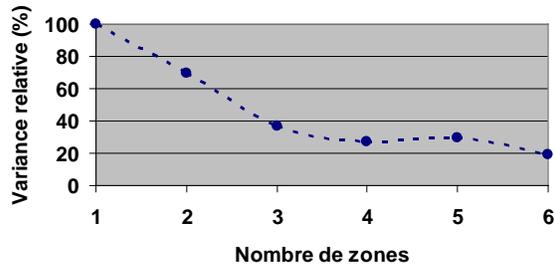
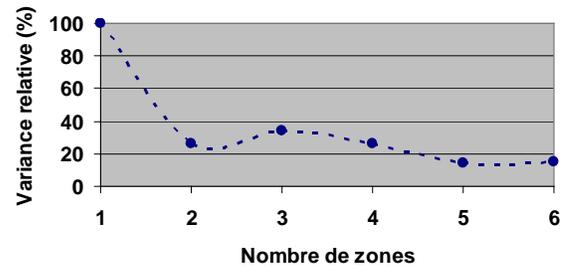


Figure 36 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (conductivité électrique apparente mesurée avec le Geonics EM-38 et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.

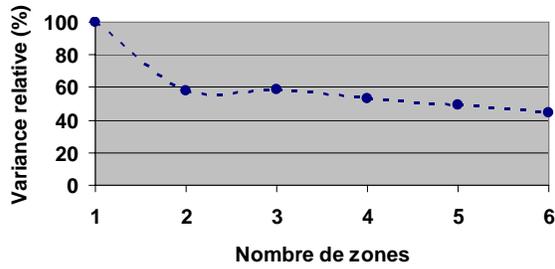
a) CEA – VERIS (0-30 cm)



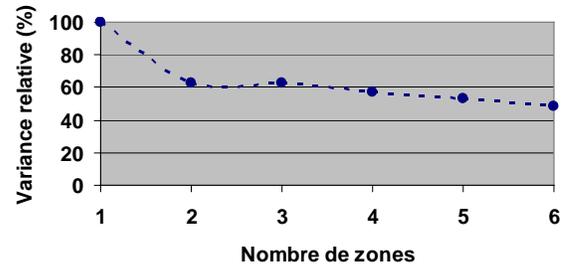
b) Élévation



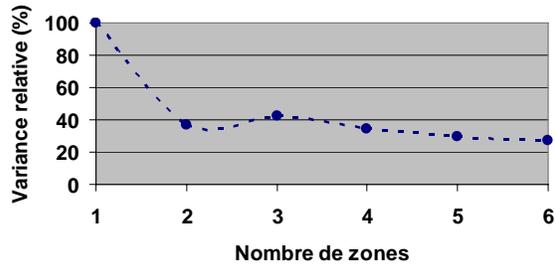
c) Al_{M-3}



d) $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$



e) $Al_{ox}+Fe_{ox}$



f) PSI

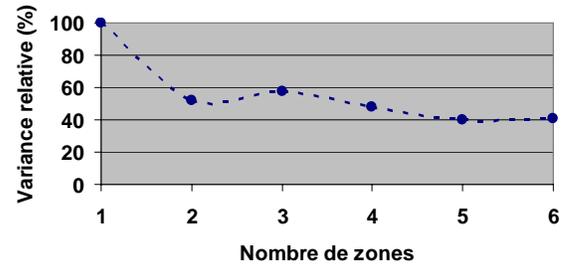
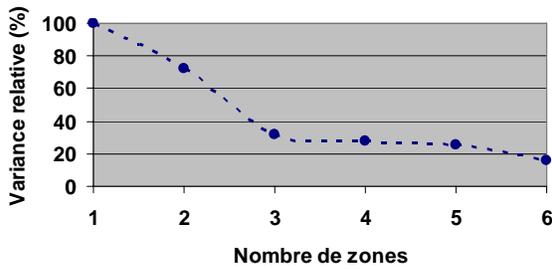
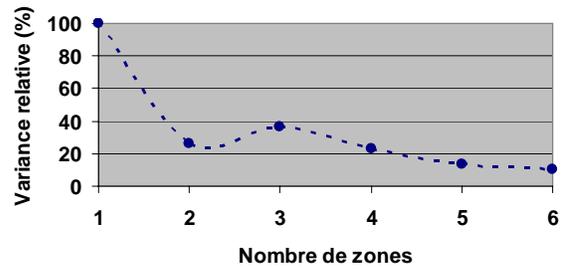


Figure 37 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS 3100 (0-30 cm) et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.

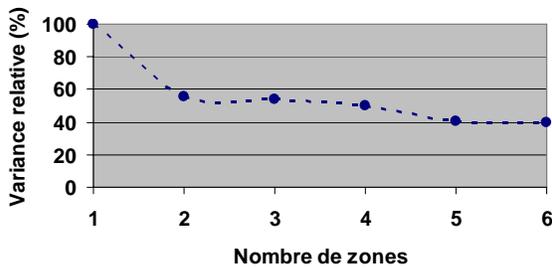
a) CEA – VERIS (0-100 cm)



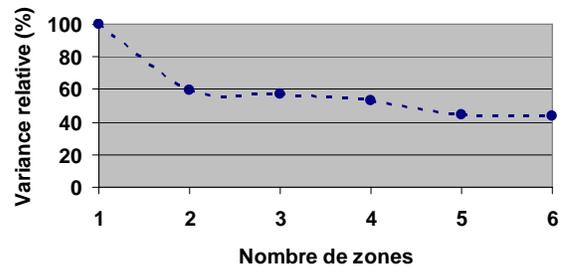
b) Élévation



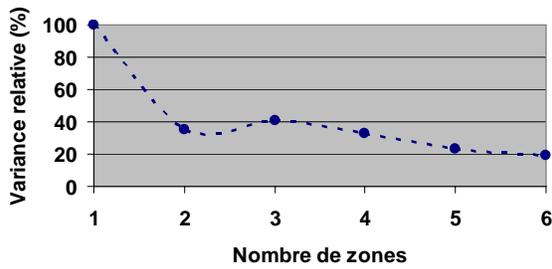
c) Al_{M-3}



d) $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$



e) $Al_{ox}+Fe_{ox}$



f) PSI

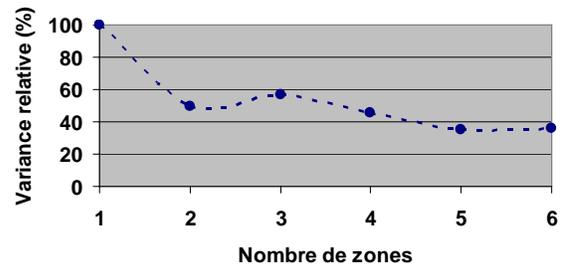
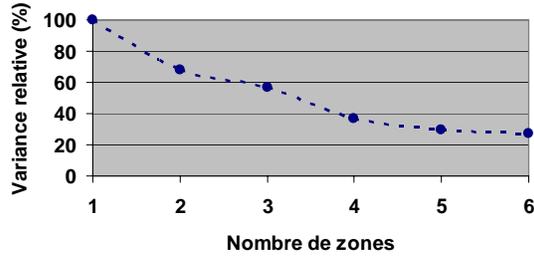
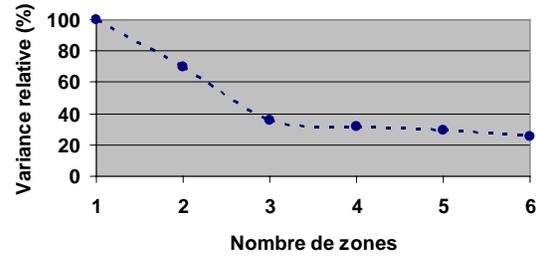


Figure 38 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS 3100 (0-100 cm) et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.

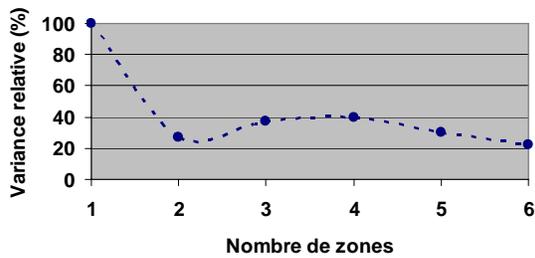
a) CEA – VERIS (0-30 cm)



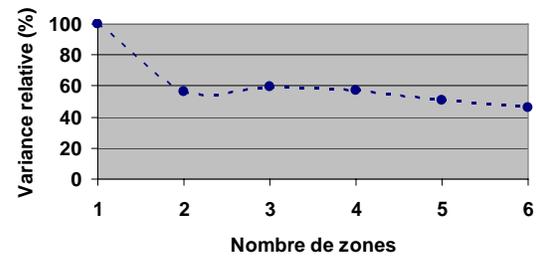
b) CEA – VERIS (0-100 cm)



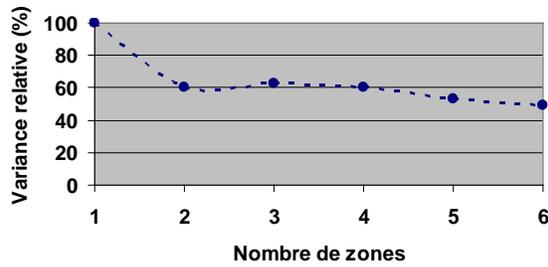
c) Élévation



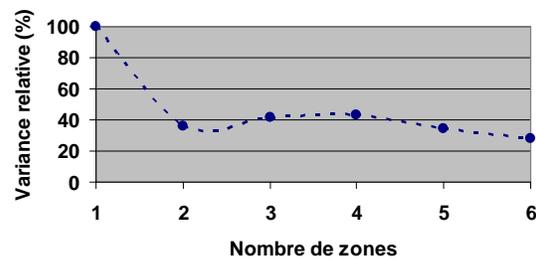
d) Al_{M-3}



e) Al_{M-3}+Fe_{M-3}



f) Al_{ox}+Fe_{ox}



g) PSI

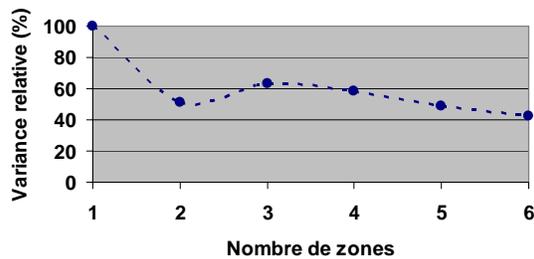
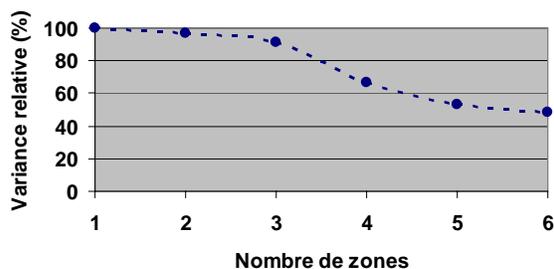
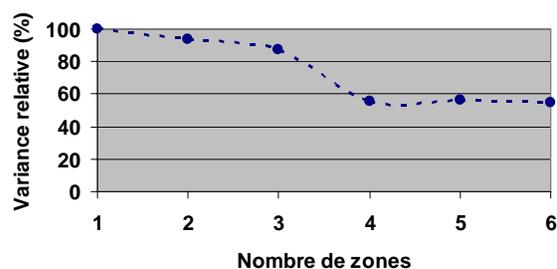


Figure 39 : Réduction de la variance des trois variables auxiliaires (conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS 3100 (0-30 et 0-100 cm) et élévation) utilisées pour la stratification (a-c) et des quatre indicateurs de la CFP (d-g) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.

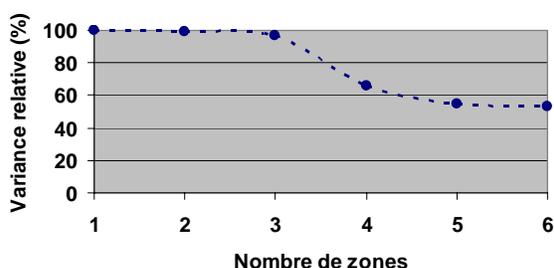
a) IKONOS-Bleu



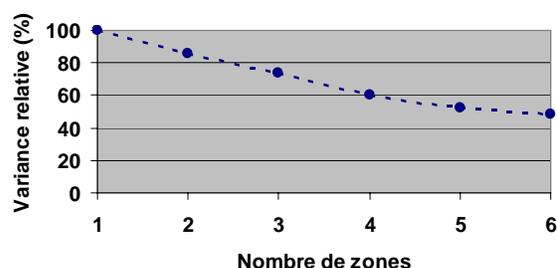
b) IKONOS-Vert



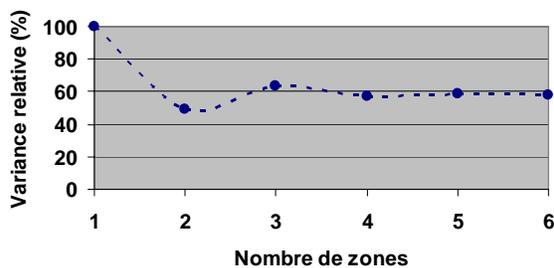
c) IKONOS-Rouge



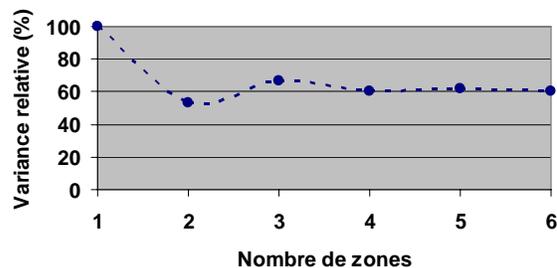
d) IKONOS-Proche-infrarouge



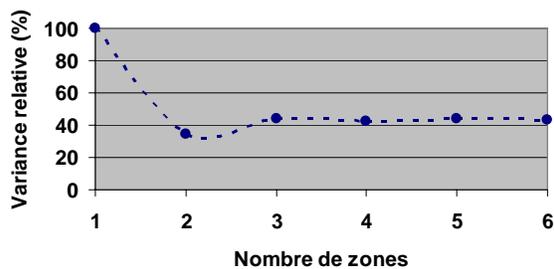
e) Al_{M-3}



f) $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$



g) $Al_{ox}+Fe_{ox}$



h) PSI

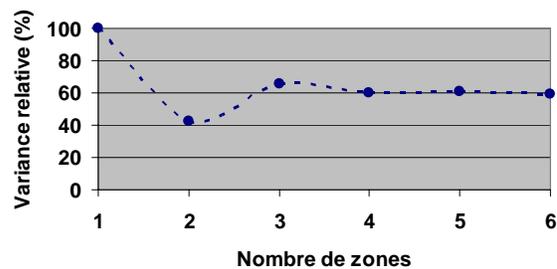
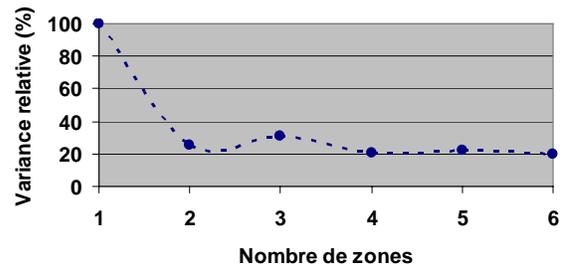
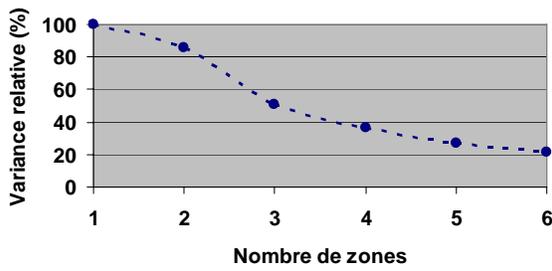


Figure 40 : Réduction de la variance des quatre variables auxiliaires (bandes spectrales d'une image IKONOS) utilisées pour la stratification (a-d) et des quatre indicateurs de la CFP (e-h) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.

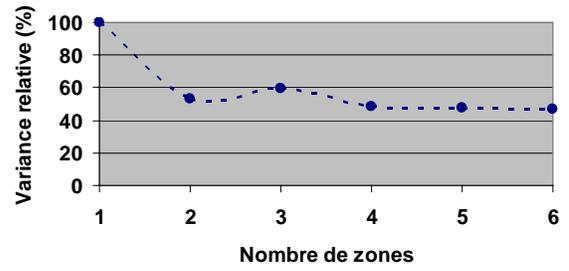
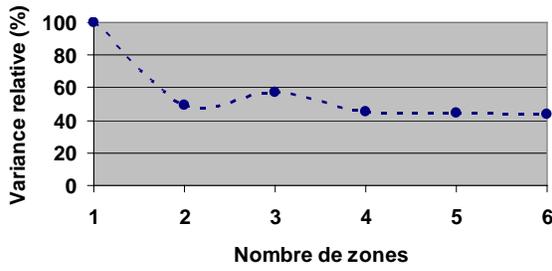
a) IKONOS – Proche-infrarouge

b) Élévation



c) Al_{M-3}

d) $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$



e) $Al_{ox}+Fe_{ox}$

f) PSI

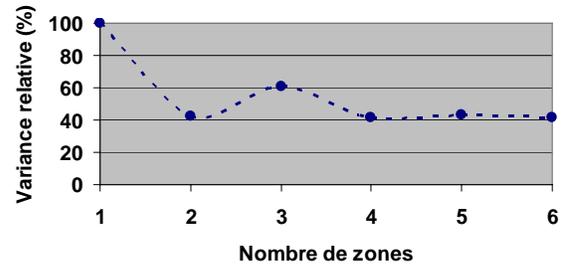
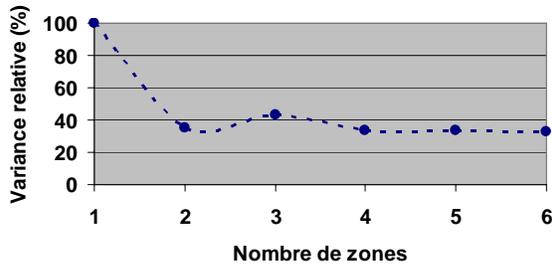
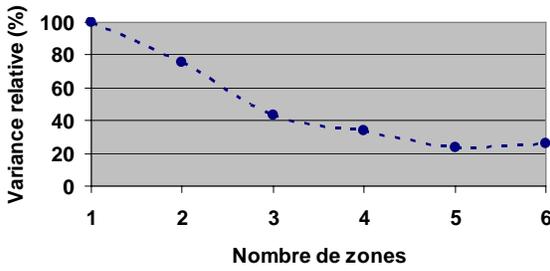
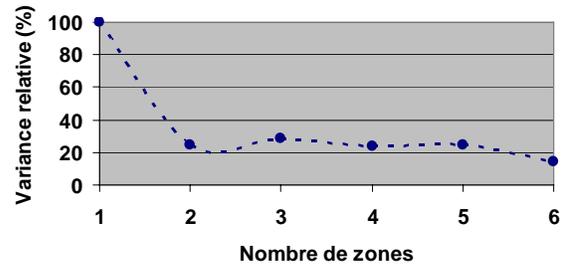


Figure 41 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (bande proche-infrarouge d'une image IKONOS et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.

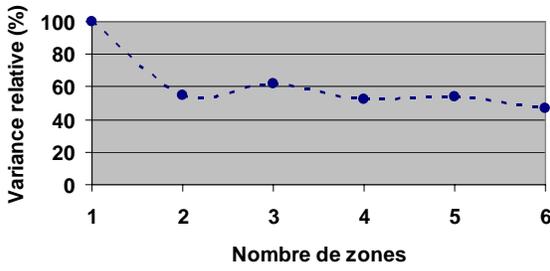
a) IKONOS – SAVI



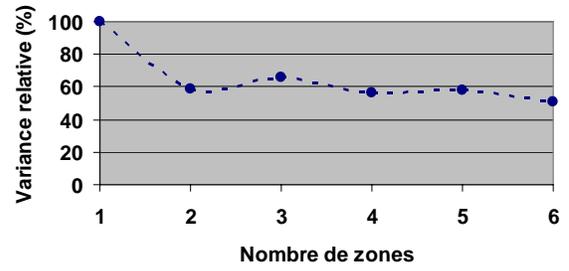
b) Élévation



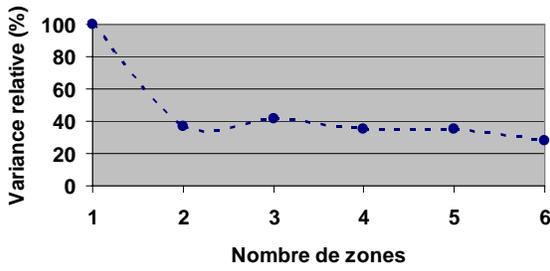
c) Al_{M-3}



d) $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$



e) $Al_{ox}+Fe_{ox}$



f) PSI

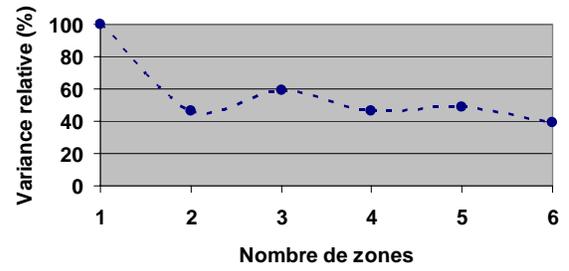
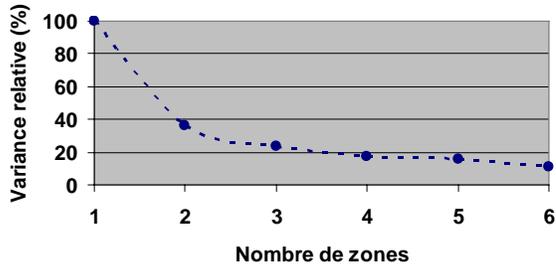
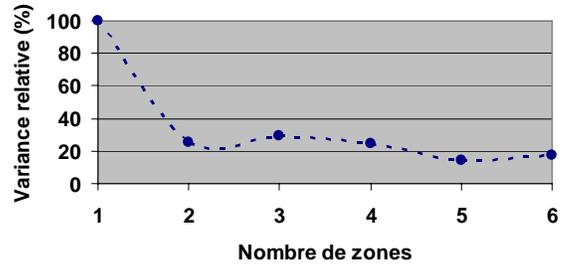


Figure 42 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (indice SAVI extrait d'une image IKONOS et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.

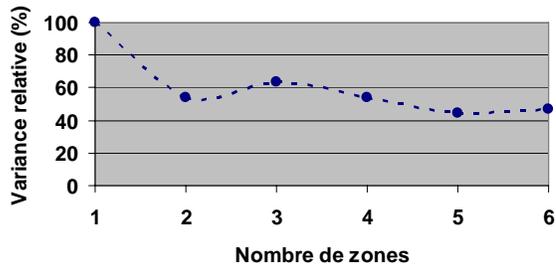
a) IKONOS – SAVI*
 * (génééré par krigeage simple anisotrope)



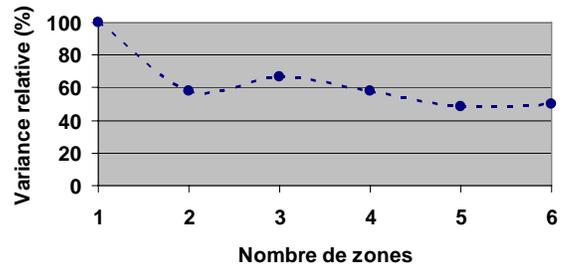
b) Élévation



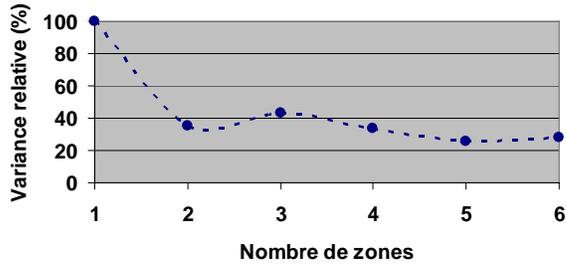
c) Al_{M-3}



d) $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$



e) $Al_{ox}+Fe_{ox}$



f) PSI

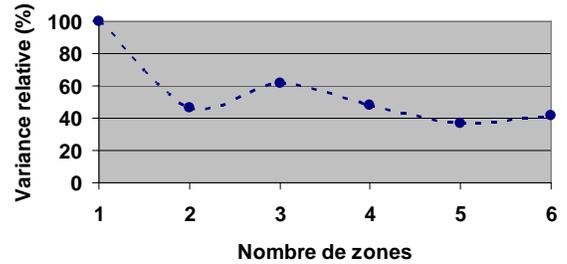


Figure 43 : Réduction de la variance des deux variables auxiliaires (indice SAVI généré par krigeage simple anisotrope à partir d'une image IKONOS et élévation) utilisées pour la stratification (a-b) et des quatre indicateurs de la CFP (c-f) suite à la segmentation des parcelles en zones d'aménagement.

6.2 Comparaison des ZA selon la valeur moyenne des indicateurs de la CFP (analyse de variance)

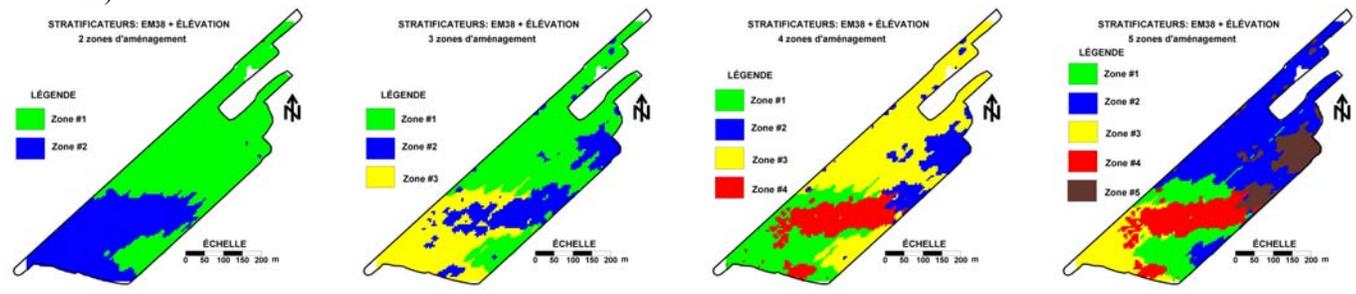
Les figures 40 et 41 montrent les zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir des différentes stratégies de stratification étudiées à l'aide du logiciel MZA. Le test statistique de Scheffe a été utilisé dans l'analyse de variance des quatre indicateurs de la CFP et de quelques propriétés de sols associées. Le but de cet exercice était de tester la signification statistique de la différence de la moyenne des quatre indicateurs de la CFP entre chaque zone délimitée prise deux à deux. Il s'agit en fait de vérifier le caractère unique sur le plan de la CFP de chacune des zones ainsi que sur le plan de leur fertilité en phosphore tel qu'évaluée à partir du P extrait au réactif Mehlich 3 (P_{M-3}) et du degré de saturation du sol en phosphore ($Psat = P_{M-3}/Al_{M-3}$). Les résultats de ces comparaisons sont présentés aux tableaux 23 à 32. Ainsi, pour l'indicateur Al_{M-3} , l'utilisation du VERIS 3100 (0-100 cm), du VERIS 3100 (0-30 cm), du VERIS 3100 (0-30 et 0-100 cm), du EM 38 (0-130 cm), de la bande spectrale PIR de l'image IKONOS, de l'indice SAVI, de l'indice SAVI krigé et des quatre bandes spectrales (bleu, vert, rouge, PIR), permettent de délimiter trois zones significativement différentes les unes des autres.

L'identification de ces trois zones statistiquement différentes les unes des autres est conforme à l'information pédologique (cartographie) des sols des trois champs mis ensemble. En effet, on retrouve une grande partie des sols des séries de Valère et de Neubois, tous deux appartenant à l'ordre des podzols, dans la partie nord du champ ainsi que, en moins grande étendue, dans la partie sud du champ. Le centre ainsi qu'une grande partie du sud des parcelles sont composées de sols des séries Le Bras appartenant à l'ordre des gleysols. En effet, la texture et le processus pédogénétique sont des facteurs qui influencent la capacité de sorption de phosphore du sol (Leclerc *et al.*, 2001) et par conséquent la CFP des sols. Par ailleurs, les gleysols de texture grossière, les sables et les loams sableux ont une capacité de fixation de P beaucoup plus faible que celle de l'ensemble des podzols qui sont pourtant presque tous de texture grossière (Vézina *et al.*, 2000). Ceci est relié à la teneur élevée de ces sols en oxydes de fer et d'aluminium, héritée de leur évolution génétique. Par conséquent, les teneurs élevées en Al_{M-3} des podzols traduisent une CFP plus élevée dans les zones du champ contenant des podzols (en particulier dans la parcelle CH-01). Par exemple, pour la stratégie de stratification où quatre zones d'aménagement sont délimitées à partir de l'élévation et de la bande spectrale du proche

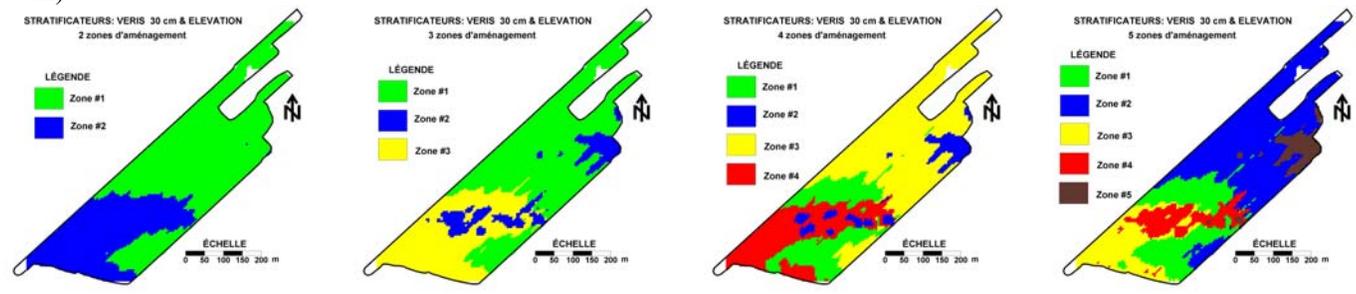
infrarouge d'une image IKONOS (Tableau 32), une moyenne de 2016 mg kg⁻¹ pour l'indicateur Al_{M-3} indique une forte CFP (zone 3 de 4) tandis qu'une moyenne de 1693 mg kg⁻¹ caractérise une zone à CFP moyenne à forte (zone 2 de 4). Par contre, une moyenne de 1231 mg kg⁻¹ (zone 4 de 4) et de 1417 mg kg⁻¹ (zone 1 de 4) rangent respectivement ces zones dans des classes de CFP « faible à moyenne » et « moyenne » selon la grille de fertilisation utilisée au Québec (CRAAQ 2003). Sur la base du test de Scheffé, ces deux dernières zones ne sont pas significativement différentes pour cet indicateur de la CFP. D'un point de vue agronomique et environnemental, la zone ayant une CFP élevée, peut en théorie recevoir une plus grande quantité de fumier et lisier qu'une zone à CFP faible sans trop de risques de pertes à l'environnement, soit par ruissellement ou par infiltration et écoulement à travers le réseau de drainage souterrain. Cependant, c'est le taux de saturation des sols en P qui détermine ce risque. Selon les études menées par Beauchemin *et al.*, (2003), plus une zone présente un P_{sat} élevé, plus on retrouve du P sous forme soluble (P_w) dans le sol ainsi que du P à la sortie des drains souterrains assainissant cette zone. Une telle accumulation de P dans le sol de la zone ayant une CFP moyenne à faible pourrait dans un plan de fertilisation recevoir des doses d'épandage selon les besoins en phosphore de la culture et selon les précédents culturaux. Lorsqu'on considère la richesse du sol exprimée en phosphore Mehlich-3 (P_{M-3}) et l'indice de saturation en phosphore exprimé par le ratio P_{M-3}/Al_{M-3}, on obtient de façon générale pour chaque stratificateur utilisé (variable auxiliaire) et pour toutes les stratégies un maximum de deux zones d'aménagement. La richesse du sol des trois champs étant exprimée en P_{M-3} (critère agronomique de référence des grilles de fertilisation au Québec), les tableaux de comparaisons multiples des moyennes par rapport à cet indice montrent que les champs ont reçu presque les mêmes doses d'épandage d'engrais de ferme ou d'engrais phosphatés dans le temps. Ainsi, l'identification de deux zones d'aménagement significativement différentes l'une de l'autre selon P_{M-3} et P_{M-3}/Al_{M-3} peut s'expliquer d'une part par le fait qu'une grande partie des champs était en culture commerciale (grande culture) et recevait par ce fait même de grande quantité de lisier de porc ou d'engrais à base de P tandis que l'autre petite partie était en fourrage (pâturage) et ne recevait pas ou très peu de quantité d'épandage de lisier de porc. D'autre part, la présence de deux zones d'aménagement significativement différentes l'une de l'autre peut s'expliquer aussi par deux processus pédogénétiques différents et par la présence de texture de surface différente

entraînant une accumulation différente de phosphore dans le sol et par conséquent une augmentation de la portion de phosphore labile (désorbable).

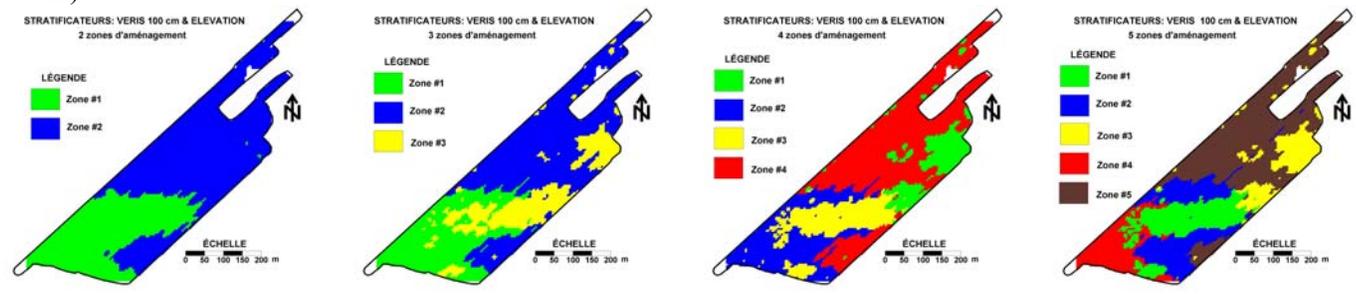
a-d) Zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir de l'élévation et de la CEA mesurée avec le Geonics EM-38 (0-130 cm).



e-h) Zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir de l'élévation et de la CEA mesurée avec le VERIS 3100 (0-30 cm).



i-l) Zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir de l'élévation et de la CEA mesurée avec le VERIS 3100 (0-100 cm).



m-p) Zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir de l'élévation et de la CEA mesurée avec le VERIS 3100 (0-30 et 0-100 cm).

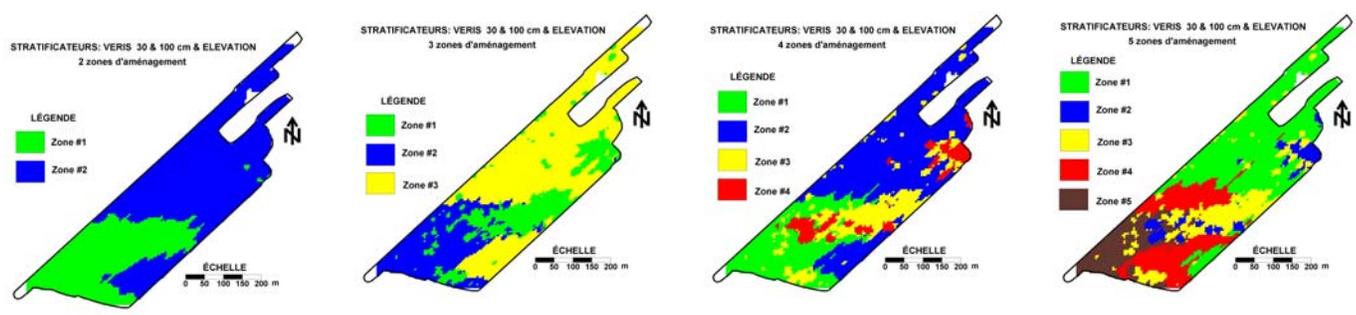
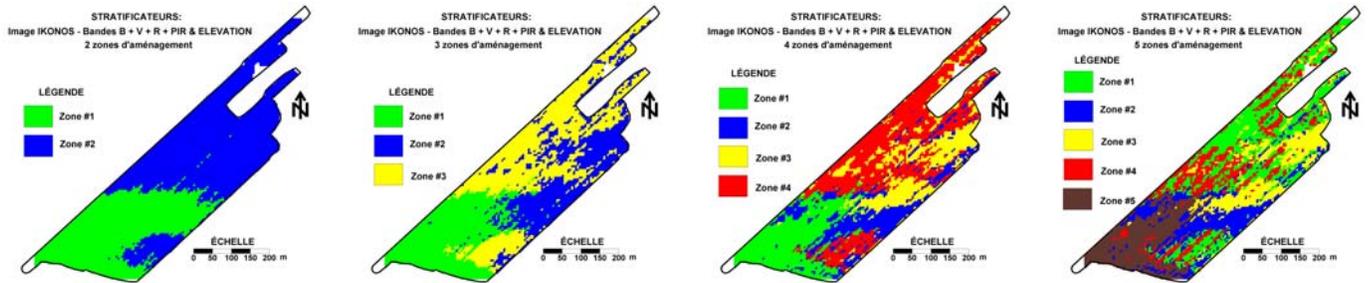
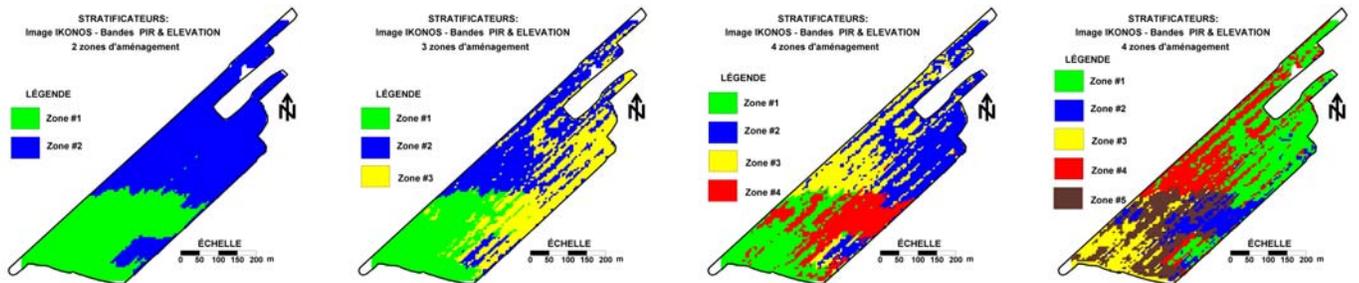


Figure 44 : Cartes des zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir de la conductivité électrique, de l'élévation et du logiciel MZA.

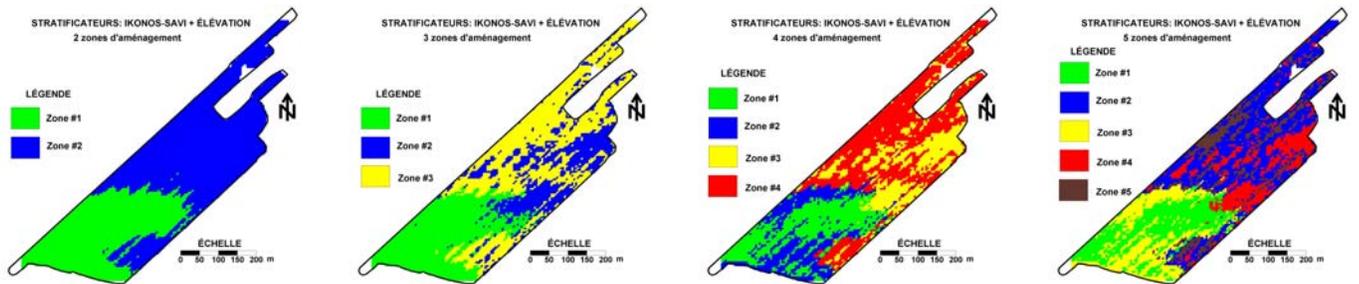
a-d) Zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir des 4 bandes de l'image IKONOS (B, V, R et PIR) et l'élévation



e-h) Zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir de la bande du PIR de l'image IKONOS et l'élévation



i-l) Zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir de l'indice SAVI mesuré à partir de l'image IKONOS et l'élévation



m-p) Zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir de l'indice SAVI généré par krigeage simple anisotrope à partir de l'image IKONOS et l'élévation

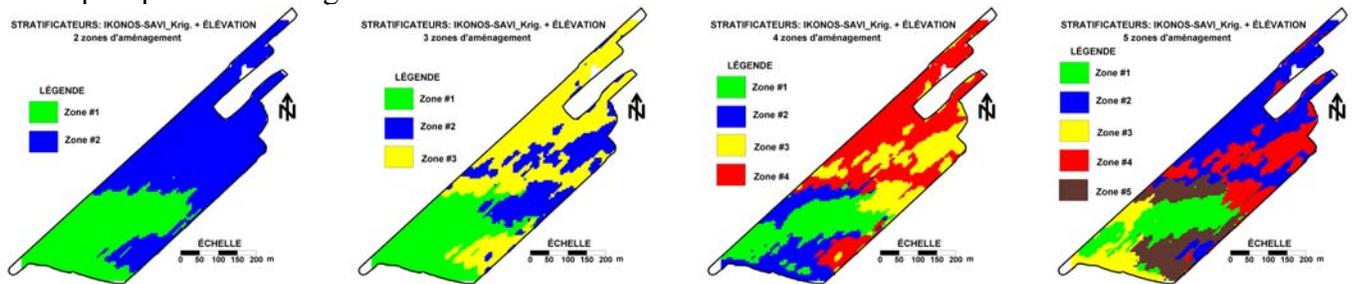


Figure 45 : Cartes des zones d'aménagement (2 à 5) délimitées à partir des images IKONOS, de l'élévation et du logiciel MZA.

Tableau 25 : Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du phosphore selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et la conductivité électrique apparente des sols mesurée avec le Geonics EM-38.

Zone	n	Al _{M-3} (mg kg ⁻¹)	Al _{M-3} +Fe _{M-3} (mmol kg ⁻¹)	Al _{ox} +Fe _{ox} (mmol kg ⁻¹)	PSI	P _{M-3} (mg kg ⁻¹)	P _{M-3} /Al _{M-3}
1 de 2	107	1805 <i>a</i> *	72 <i>a</i>	299 <i>a</i>	670 <i>a</i>	142 <i>a</i>	0,09 <i>b</i>
2 de 2	57	1268 <i>b</i>	54 <i>b</i>	157 <i>b</i>	388 <i>b</i>	152 <i>a</i>	0,13 <i>a</i>
1 de 3	81	1928 <i>a</i>	76 <i>a</i>	323 <i>a</i>	747 <i>a</i>	133 <i>a</i>	0,07 <i>b</i>
2 de 3	46	1197 <i>c</i>	51 <i>c</i>	169 <i>c</i>	353 <i>b</i>	176 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
3 de 3	37	1466 <i>b</i>	61 <i>b</i>	189 <i>b</i>	463 <i>b</i>	137 <i>a</i>	0,11 <i>b</i>
1 de 4	32	1524 <i>b</i>	63 <i>b</i>	203 <i>b</i>	475 <i>b</i>	124 <i>a</i>	0,09 <i>b</i>
2 de 4	24	1391 <i>c</i>	58 <i>b</i>	210 <i>b</i>	438 <i>b</i>	181 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
3 de 4	78	1928 <i>a</i>	76 <i>a</i>	324 <i>a</i>	736 <i>a</i>	134 <i>a</i>	0,07 <i>b</i>
4 de 4	30	1096 <i>c</i>	48 <i>c</i>	139 <i>c</i>	357 <i>b</i>	172 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
1 de 5	28	1780 <i>a</i>	71 <i>a</i>	279 <i>a</i>	621 <i>a</i>	98 <i>b</i>	0,06 <i>b</i>
2 de 5	70	1916 <i>a</i>	75 <i>a</i>	322 <i>a</i>	735 <i>a</i>	143 <i>b</i>	0,08 <i>b</i>
3 de 5	14	1232 <i>b</i>	54 <i>b</i>	127 <i>c</i>	309 <i>b</i>	153 <i>b</i>	0,14 <i>a</i>
4 de 5	30	1121 <i>c</i>	49 <i>c</i>	144 <i>b</i>	365 <i>b</i>	169 <i>b</i>	0,16 <i>a</i>
5 de 5	22	1391 <i>b</i>	58 <i>a</i>	206 <i>b</i>	445 <i>b</i>	182 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
1 de 6	18	1074 <i>c</i>	47 <i>c</i>	137 <i>c</i>	304 <i>b</i>	154 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
2 de 6	70	1928 <i>a</i>	76 <i>a</i>	323 <i>a</i>	738 <i>a</i>	140 <i>a</i>	0,08 <i>b</i>
3 de 6	11	1237 <i>b</i>	54 <i>b</i>	131 <i>c</i>	310 <i>b</i>	150 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
4 de 6	16	1167 <i>c</i>	51 <i>b</i>	144 <i>b</i>	416 <i>b</i>	185 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
5 de 6	27	1767 <i>a</i>	70 <i>a</i>	277 <i>a</i>	622 <i>b</i>	98 <i>a</i>	0,06 <i>b</i>
6 de 6	22	1416 <i>b</i>	59 <i>b</i>	213 <i>b</i>	449 <i>b</i>	184 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>

* Pour chaque stratégie de stratification (2, 3, 4, 5 et 6 zones), les zones présentant la même lettre ne sont pas significativement différentes en moyenne selon le test de comparaison multiple de Scheffe (P=0,05).

Tableau 26 : Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et la conductivité électrique apparente des sols mesurée avec le VERIS (0-100 cm).

Zone	n	Al _{M-3} (mg kg ⁻¹)	Zone	n	Al _{M-3} (mg kg ⁻¹)	Al _{M-3} +Fe _{M-3} (mmol kg ⁻¹)	Al _{ox} +Fe _{ox} (mmol kg ⁻¹)
1 de 2	57	1268 <i>b</i> *	54 <i>b</i>	157 <i>b</i>	388 <i>b</i>	152 <i>a</i>	0,13 <i>a</i>
2 de 2	107	1805 <i>a</i>	72 <i>a</i>	299 <i>a</i>	670 <i>a</i>	142 <i>a</i>	0,09 <i>b</i>
1 de 3	37	1466 <i>b</i>	61 <i>b</i>	189 <i>b</i>	464 <i>b</i>	137 <i>a</i>	0,11 <i>b</i>
2 de 3	81	1928 <i>a</i>	76 <i>a</i>	323 <i>a</i>	747 <i>a</i>	133 <i>a</i>	0,07 <i>b</i>
3 de 3	46	1197 <i>c</i>	51 <i>c</i>	169 <i>b</i>	353 <i>b</i>	176 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
1 de 4	24	1391 <i>b</i>	58 <i>b</i>	210 <i>b</i>	438 <i>b</i>	181 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
2 de 4	32	1524 <i>b</i>	63 <i>b</i>	203 <i>b</i>	475 <i>b</i>	124 <i>a</i>	0,09 <i>b</i>
3 de 4	30	1096 <i>c</i>	48 <i>c</i>	139 <i>c</i>	357 <i>b</i>	172 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
4 de 4	78	1928 <i>a</i>	76 <i>a</i>	324 <i>a</i>	736 <i>a</i>	134 <i>a</i>	0,07 <i>b</i>
1 de 5	30	1121 <i>c</i>	49 <i>b</i>	144 <i>b</i>	365 <i>b</i>	169 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
2 de 5	28	1780 <i>a</i>	71 <i>a</i>	279 <i>a</i>	621 <i>a</i>	98 <i>b</i>	0,06 <i>b</i>
3 de 5	22	1391 <i>b</i>	58 <i>b</i>	206 <i>b</i>	445 <i>b</i>	182 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
4 de 5	14	1232 <i>b</i>	54 <i>b</i>	127 <i>b</i>	309 <i>b</i>	153 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
5 de 5	70	1916 <i>a</i>	75 <i>a</i>	322 <i>a</i>	735 <i>a</i>	143 <i>a</i>	0,02 <i>b</i>
1 de 6	9	1376 <i>b</i>	57 <i>b</i>	192 <i>b</i>	455 <i>a</i>	226 <i>a</i>	0,20 <i>a</i>
2 de 6	30	1103 <i>b</i>	48 <i>c</i>	139 <i>c</i>	361 <i>b</i>	167 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
3 de 6	26	1575 <i>b</i>	63 <i>b</i>	267 <i>a</i>	548 <i>a</i>	137 <i>a</i>	0,09 <i>b</i>
4 de 6	58	1966 <i>a</i>	77 <i>a</i>	325 <i>a</i>	751 <i>a</i>	147 <i>a</i>	0,08 <i>b</i>
5 de 6	27	1767 <i>a</i>	70 <i>a</i>	277 <i>a</i>	622 <i>a</i>	98 <i>b</i>	0,06 <i>b</i>
6 de 6	14	1232 <i>b</i>	54 <i>c</i>	127 <i>c</i>	309 <i>b</i>	153 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>

* Pour chaque stratégie de stratification (2, 3, 4, 5 et 6 zones), les zones présentant la même lettre ne sont pas significativement différentes en moyenne selon le test de comparaison multiple de Scheffe (P=0,05).

Tableau 27 : Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et la conductivité électrique apparente des sols mesurée avec le VERIS (0-30 cm).

Zone	n	Al _{M-3} (mg kg ⁻¹)	Al _{M-3} +Fe _{M-3} (mmol kg ⁻¹)	Al _{ox} +Fe _{ox} (mmol kg ⁻¹)	PSI	P _{M-3} (mg kg ⁻¹)	P _{M-3} /Al _{M-3}
1 de 2	109	1801 <i>a</i> *	71 <i>a</i>	296 <i>a</i>	666 <i>a</i>	141 <i>b</i>	0,09 <i>b</i>
2 de 2	55	1257 <i>b</i>	54 <i>b</i>	159 <i>b</i>	386 <i>b</i>	156 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
1 de 3	94	1846 <i>a</i>	73 <i>a</i>	309 <i>a</i>	697 <i>a</i>	136 <i>b</i>	0,08 <i>c</i>
2 de 3	21	1206 <i>b</i>	52 <i>b</i>	159 <i>b</i>	349 <i>b</i>	207 <i>a</i>	0,19 <i>a</i>
3 de 3	49	1359 <i>c</i>	57 <i>b</i>	175 <i>b</i>	429 <i>b</i>	138 <i>b</i>	0,12 <i>b</i>
1 de 4	30	1746 <i>a</i>	70 <i>a</i>	274 <i>a</i>	616 <i>a</i>	100 <i>b</i>	0,07 <i>b</i>
2 de 4	12	1264 <i>b</i>	53 <i>b</i>	186 <i>b</i>	420 <i>a</i>	219 <i>a</i>	0,20 <i>b</i>
3 de 4	87	1815 <i>a</i>	72 <i>a</i>	301 <i>a</i>	675 <i>a</i>	143 <i>b</i>	0,08 <i>a</i>
4 de 4	35	1142 <i>c</i>	50 <i>b</i>	125 <i>b</i>	331 <i>b</i>	167 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
1 de 5	33	1678 <i>a</i>	67 <i>a</i>	262 <i>a</i>	587 <i>a</i>	103 <i>b</i>	0,07 <i>b</i>
2 de 5	83	1832 <i>a</i>	72 <i>a</i>	305 <i>a</i>	689 <i>a</i>	144 <i>b</i>	0,08 <i>b</i>
3 de 5	19	1204 <i>b</i>	53 <i>a</i>	131 <i>b</i>	334 <i>a</i>	153 <i>b</i>	0,13 <i>a</i>
4 de 5	19	1123 <i>c</i>	49 <i>b</i>	127 <i>b</i>	347 <i>b</i>	183 <i>a</i>	0,17 <i>a</i>
5 de 5	10	1380 <i>c</i>	57 <i>a</i>	210 <i>b</i>	439 <i>b</i>	221 <i>a</i>	0,19 <i>a</i>
1 de 6	18	1143 <i>c</i>	50 <i>a</i>	128 <i>c</i>	354 <i>a</i>	189 <i>a</i>	0,17 <i>a</i>
2 de 6	58	1934 <i>a</i>	76 <i>a</i>	314 <i>a</i>	728 <i>b</i>	136 <i>a</i>	0,07 <i>b</i>
3 de 6	33	1646 <i>b</i>	66 <i>b</i>	256 <i>b</i>	576 <i>a</i>	101 <i>b</i>	0,07 <i>b</i>
4 de 6	19	1204 <i>c</i>	53 <i>a</i>	131 <i>c</i>	334 <i>a</i>	153 <i>a</i>	0,12 <i>a</i>
5 de 6	31	1585 <i>b</i>	64 <i>b</i>	273 <i>b</i>	571 <i>a</i>	165 <i>a</i>	0,11 <i>b</i>
6 de 6	5	1270 <i>c</i>	53 <i>b</i>	213 <i>b</i>	437 <i>a</i>	256 <i>a</i>	0,26 <i>a</i>

* Pour chaque stratégie de stratification (2, 3, 4, 5 et 6 zones), les zones présentant la même lettre ne sont pas significativement différentes en moyenne selon le test de comparaison multiple de Scheffe (P=0,05).

Tableau 28 : Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et la conductivité électrique apparente mesurée avec le VERIS (0-30 et 0-100 cm).

Zone	n	Al _{M-3} (mg kg ⁻¹)	Al _{M-3} +Fe _{M-3} (mmol kg ⁻¹)	Al _{ox} +Fe _{ox} (mmol kg ⁻¹)	PSI	P _{M-3} (mg kg ⁻¹)	P _{M-3} /Al _{M-3}
1 de 2	56	1255 <i>b</i> *	54 <i>b</i>	156 <i>b</i>	386 <i>b</i>	154 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
2 de 2	108	1807 <i>a</i>	72 <i>a</i>	299 <i>a</i>	669 <i>a</i>	142 <i>a</i>	0,09 <i>b</i>
1 de 3	45	1204 <i>c</i>	51 <i>c</i>	164 <i>b</i>	365 <i>b</i>	172 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
2 de 3	32	1410 <i>b</i>	60 <i>b</i>	183 <i>b</i>	444 <i>b</i>	152 <i>a</i>	0,12 <i>a</i>
3 de 3	87	1910 <i>a</i>	75 <i>a</i>	319 <i>a</i>	727 <i>a</i>	130 <i>a</i>	0,07 <i>b</i>
1 de 4	34	1484 <i>b</i>	62 <i>b</i>	195 <i>b</i>	474 <i>b</i>	139 <i>a</i>	0,11 <i>b</i>
2 de 4	83	1915 <i>a</i>	75 <i>a</i>	321 <i>a</i>	739 <i>a</i>	134 <i>b</i>	0,07 <i>b</i>
3 de 4	34	1175 <i>c</i>	50 <i>c</i>	163 <i>b</i>	338 <i>b</i>	156 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
4 de 4	13	1238 <i>b</i>	53 <i>b</i>	168 <i>b</i>	380 <i>b</i>	216 <i>a</i>	0,20 <i>a</i>
1 de 5	73	1910 <i>a</i>	75 <i>a</i>	319 <i>a</i>	732 <i>a</i>	144 <i>a</i>	0,08 <i>b</i>
2 de 5	12	1249 <i>b</i>	53 <i>b</i>	173 <i>b</i>	398 <i>b</i>	210 <i>a</i>	0,19 <i>a</i>
3 de 5	32	1169 <i>b</i>	50 <i>b</i>	162 <i>b</i>	357 <i>b</i>	147 <i>a</i>	0,13 <i>a</i>
4 de 5	30	1776 <i>a</i>	71 <i>a</i>	279 <i>a</i>	627 <i>b</i>	100 <i>a</i>	0,06 <i>b</i>
5 de 5	17	1197 <i>b</i>	53 <i>b</i>	121 <i>b</i>	318 <i>b</i>	185 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
1 de 6	15	1233 <i>c</i>	54 <i>b</i>	125 <i>c</i>	341 <i>b</i>	169 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
2 de 6	8	1214 <i>c</i>	52 <i>b</i>	171 <i>b</i>	374 <i>a</i>	207 <i>a</i>	0,20 <i>a</i>
3 de 6	25	1050 <i>c</i>	46 <i>b</i>	130 <i>c</i>	320 <i>b</i>	157 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
4 de 6	67	1928 <i>a</i>	76 <i>a</i>	323 <i>a</i>	738 <i>a</i>	143 <i>a</i>	0,08 <i>b</i>
5 de 6	19	1501 <i>b</i>	61 <i>a</i>	237 <i>b</i>	497 <i>a</i>	168 <i>a</i>	0,12 <i>a</i>
6 de 6	30	1776 <i>a</i>	71 <i>a</i>	279 <i>a</i>	627 <i>a</i>	100 <i>a</i>	0,06 <i>b</i>

* Pour chaque stratégie de stratification (2, 3, 4, 5 et 6 zones), les zones présentant la même lettre ne sont pas significativement différentes en moyenne selon le test de comparaison multiple de Scheffe (P=0,05).

Tableau 29 : Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et des bandes spectrales bleu, vert, rouge et proche infrarouge d'une image IKONOS.

Zone	n	Al _{M-3} (mg kg ⁻¹)	Al _{M-3} +Fe _{M-3} (mmol kg ⁻¹)	Al _{ox} +Fe _{ox} (mmol kg ⁻¹)	PSI	P _{M-3} (mg kg ⁻¹)	P _{M-3} /Al _{M-3}
1 de 2	62	1295 <i>b</i> *	55 <i>b</i>	169 <i>b</i>	400 <i>b</i>	152 <i>a</i>	0,13 <i>a</i>
2 de 2	102	1815 <i>a</i>	72 <i>a</i>	299 <i>a</i>	677 <i>a</i>	142 <i>a</i>	0,09 <i>b</i>
1 de 3	42	1337 <i>b</i>	57 <i>b</i>	165 <i>b</i>	415 <i>b</i>	158 <i>a</i>	0,13 <i>a</i>
2 de 3	45	1380 <i>b</i>	57 <i>b</i>	210 <i>b</i>	431 <i>b</i>	168 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
3 de 3	77	1911 <i>a</i>	75 <i>a</i>	319 <i>a</i>	741 <i>a</i>	126 <i>a</i>	0,07 <i>b</i>
1 de 4	27	1350 <i>b</i>	58 <i>b</i>	150 <i>c</i>	355 <i>b</i>	152 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
2 de 4	41	1404 <i>b</i>	58 <i>b</i>	221 <i>b</i>	508 <i>b</i>	158 <i>a</i>	0,12 <i>a</i>
3 de 4	26	1462 <i>b</i>	60 <i>b</i>	201 <i>b</i>	440 <i>b</i>	167 <i>a</i>	0,13 <i>a</i>
4 de 4	70	1906 <i>a</i>	75 <i>a</i>	324 <i>a</i>	743 <i>a</i>	128 <i>a</i>	0,07 <i>b</i>
1 de 5	62	1843 <i>a</i>	73 <i>a</i>	314 <i>a</i>	647 <i>b</i>	145 <i>a</i>	0,08 <i>b</i>
2 de 5	33	1370 <i>b</i>	57 <i>b</i>	213 <i>b</i>	504 <i>b</i>	164 <i>a</i>	0,13 <i>a</i>
3 de 5	24	1366 <i>b</i>	57 <i>b</i>	180 <i>b</i>	384 <i>b</i>	172 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
4 de 5	21	1961 <i>a</i>	76 <i>a</i>	325 <i>a</i>	927 <i>a</i>	75 <i>b</i>	0,04 <i>b</i>
5 de 5	24	1333 <i>b</i>	57 <i>b</i>	141 <i>c</i>	350 <i>c</i>	160 <i>a</i>	0,13 <i>a</i>
1 de 6	4	1513 <i>b</i>	61 <i>b</i>	246 <i>b</i>	414 <i>b</i>	131 <i>a</i>	0,09 <i>b</i>
2 de 6	23	1345 <i>b</i>	56 <i>b</i>	178 <i>b</i>	389 <i>c</i>	169 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
3 de 6	62	1862 <i>a</i>	74 <i>a</i>	317 <i>a</i>	655 <i>b</i>	146 <i>a</i>	0,08 <i>b</i>
4 de 6	30	1328 <i>b</i>	56 <i>b</i>	201 <i>b</i>	491 <i>b</i>	168 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
5 de 6	24	1333 <i>b</i>	57 <i>b</i>	141 <i>c</i>	350 <i>c</i>	160 <i>a</i>	0,13 <i>a</i>
6 de 6	21	1961 <i>a</i>	76 <i>a</i>	325 <i>a</i>	927 <i>a</i>	75 <i>b</i>	0,04 <i>b</i>

* Pour chaque stratégie de stratification (2, 3, 4, 5 et 6 zones), les zones présentant la même lettre ne sont pas significativement différentes en moyenne selon le test de comparaison multiple de Scheffe (P=0,05).

Tableau 30 : Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et de l'indice SAVI calculé à partir des bandes spectrales d'une image IKONOS.

Zone	n	Al _{M-3} (mg kg ⁻¹)	Al _{M-3} +Fe _{M-3} (mmol kg ⁻¹)	Al _{ox} +Fe _{ox} (mmol kg ⁻¹)	PSI	P _{M-3} (mg kg ⁻¹)	P _{M-3} /Al _{M-3}
1 de 2	61	1316 <i>b</i> *	56 <i>b</i>	161 <i>b</i>	417 <i>b</i>	147 <i>a</i>	0,17 <i>a</i>
2 de 2	103	1797 <i>a</i>	71 <i>a</i>	298 <i>a</i>	664 <i>a</i>	145 <i>b</i>	0,09 <i>b</i>
1 de 3	50	1289 <i>c</i>	55 <i>c</i>	150 <i>c</i>	384 <i>b</i>	161 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
2 de 3	36	1504 <i>b</i>	61 <i>b</i>	224 <i>b</i>	497 <i>b</i>	143 <i>a</i>	0,12 <i>a</i>
3 de 3	78	1882 <i>a</i>	74 <i>a</i>	326 <i>a</i>	728 <i>a</i>	132 <i>a</i>	0,07 <i>b</i>
1 de 4	34	1193 <i>c</i>	52 <i>c</i>	138 <i>c</i>	355 <i>c</i>	157 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
2 de 4	27	1507 <i>b</i>	62 <i>b</i>	219 <i>b</i>	510 <i>b</i>	133 <i>a</i>	0,10 <i>a</i>
3 de 4	32	1529 <i>b</i>	62 <i>b</i>	226 <i>b</i>	488 <i>b</i>	162 <i>a</i>	0,12 <i>a</i>
4 de 4	71	1905 <i>a</i>	75 <i>a</i>	326 <i>a</i>	738 <i>a</i>	138 <i>a</i>	0,08 <i>b</i>
1 de 5	32	1191 <i>c</i>	52 <i>c</i>	139 <i>c</i>	355 <i>c</i>	158 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
2 de 5	59	1884 <i>a</i>	74 <i>a</i>	314 <i>a</i>	715 <i>a</i>	145 <i>a</i>	0,08 <i>b</i>
3 de 5	27	1495 <i>b</i>	62 <i>b</i>	214 <i>b</i>	502 <i>b</i>	140 <i>a</i>	0,11 <i>a</i>
4 de 5	24	1442 <i>b</i>	59 <i>b</i>	213 <i>b</i>	479 <i>b</i>	171 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
5 de 5	22	1871 <i>a</i>	74 <i>a</i>	324 <i>a</i>	695 <i>a</i>	111 <i>a</i>	0,06 <i>b</i>
1 de 6	22	1143 <i>c</i>	50 <i>c</i>	140 <i>c</i>	337 <i>b</i>	156 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
2 de 6	16	1826 <i>a</i>	73 <i>a</i>	309 <i>a</i>	671 <i>a</i>	126 <i>a</i>	0,08 <i>a</i>
3 de 6	53	1902 <i>a</i>	75 <i>a</i>	321 <i>a</i>	731 <i>a</i>	150 <i>a</i>	0,08 <i>a</i>
4 de 6	22	1496 <i>b</i>	61 <i>b</i>	220 <i>b</i>	498 <i>b</i>	178 <i>a</i>	0,14 <i>a</i>
5 de 6	33	1649 <i>b</i>	66 <i>b</i>	255 <i>b</i>	556 <i>b</i>	114 <i>a</i>	0,08 <i>a</i>
6 de 6	18	1273 <i>c</i>	55 <i>c</i>	149 <i>c</i>	425 <i>b</i>	158	0,13 <i>a</i>

* Pour chaque stratégie de stratification (2, 3, 4, 5 et 6 zones), les zones présentant la même lettre ne sont pas significativement différentes en moyenne selon le test de comparaison multiple de Scheffe (P=0,05).

Tableau 31 : Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et de l'indice SAVI issu d'une image IKONOS après krigeage simple anisotrope.

Zone	n	Al _{M-3} (mg kg ⁻¹)	Al _{M-3} +Fe _{M-3} (mmol kg ⁻¹)	Al _{ox} +Fe _{ox} (mmol kg ⁻¹)	PSI	P _{M-3} (mg kg ⁻¹)	P _{M-3} /Al _{M-3}
1 de 2	61	1290 <i>b</i> *	55 <i>b</i>	167 <i>b</i>	396 <i>b</i>	148 <i>a</i>	0.13 <i>a</i>
2 de 2	103	1813 <i>a</i>	72 <i>a</i>	299 <i>a</i>	677 <i>a</i>	145 <i>a</i>	0.09 <i>b</i>
1 de 3	44	1320 <i>b</i>	56 <i>b</i>	154 <i>c</i>	387 <i>b</i>	159 <i>a</i>	0.13 <i>a</i>
2 de 3	39	1409 <i>b</i>	58 <i>b</i>	208 <i>b</i>	470 <i>b</i>	150 <i>a</i>	0.18 <i>a</i>
3 de 3	81	1881 <i>a</i>	74 <i>a</i>	322 <i>a</i>	722 <i>a</i>	138 <i>a</i>	0.08 <i>b</i>
1 de 4	32	1094 <i>c</i>	49 <i>c</i>	114 <i>c</i>	282 <i>c</i>	166 <i>a</i>	0.16 <i>a</i>
2 de 4	28	1618 <i>b</i>	66 <i>b</i>	245 <i>b</i>	591 <i>b</i>	128 <i>a</i>	0.09 <i>b</i>
3 de 4	33	1530 <i>b</i>	62 <i>b</i>	231 <i>b</i>	517 <i>b</i>	144 <i>a</i>	0.11 <i>a</i>
4 de 4	71	1896 <i>a</i>	75 <i>a</i>	322 <i>a</i>	721 <i>a</i>	145 <i>a</i>	0.08 <i>b</i>
1 de 5	32	1086 <i>c</i>	48 <i>c</i>	114 <i>c</i>	282 <i>b</i>	162 <i>a</i>	0.16 <i>a</i>
2 de 5	59	1921 <i>a</i>	76 <i>a</i>	329 <i>a</i>	741 <i>a</i>	155 <i>a</i>	0.08 <i>b</i>
3 de 5	10	1360 <i>b</i>	58 <i>b</i>	178 <i>c</i>	548 <i>b</i>	181 <i>a</i>	0.15 <i>a</i>
4 de 5	32	1581 <i>b</i>	64 <i>b</i>	240 <i>b</i>	535 <i>b</i>	150 <i>a</i>	0.11 <i>b</i>
5 de 5	31	1714 <i>a</i>	68 <i>b</i>	273 <i>b</i>	598 <i>b</i>	96 <i>a</i>	0.06 <i>b</i>
1 de 6	9	1479 <i>b</i>	62 <i>b</i>	203 <i>b</i>	583 <i>a</i>	178 <i>a</i>	0.13 <i>a</i>
2 de 6	40	1914 <i>a</i>	76 <i>a</i>	330 <i>a</i>	657 <i>a</i>	162 <i>a</i>	0.09 <i>b</i>
3 de 6	36	1874 <i>a</i>	74 <i>a</i>	300 <i>a</i>	788 <i>a</i>	118 <i>a</i>	0.07 <i>b</i>
4 de 6	21	1212 <i>b</i>	52 <i>c</i>	179 <i>b</i>	362 <i>b</i>	178 <i>a</i>	0.16 <i>a</i>
5 de 6	30	1699 <i>a</i>	68 <i>b</i>	274 <i>a</i>	608 <i>a</i>	100 <i>a</i>	0.07 <i>b</i>
6 de 6	28	1131 <i>c</i>	50 <i>c</i>	115 <i>c</i>	289 <i>b</i>	169 <i>a</i>	0.16 <i>a</i>

* Pour chaque stratégie de stratification (2, 3, 4, 5 et 6 zones), les zones présentant la même lettre ne sont pas significativement différentes en moyenne selon le test de comparaison multiple de Scheffe (P=0,05).

Tableau 32 : Comparaison multiple des moyennes de quelques propriétés de sol reliées à la capacité de fixation du P selon les zones d'aménagement délimitées à partir de l'élévation et de la bande spectrale du proche infrarouge d'une image IKONOS.

Zone	n	Al _{M-3} (mg kg ⁻¹)	Al _{M-3} +Fe _{M-3} (mmol kg ⁻¹)	Al _{ox} +Fe _{ox} (mmol kg ⁻¹)	PSI	P _{M-3} (mg kg ⁻¹)	P _{M-3} /Al _{M-3}
1 de 2	64	1312 <i>b</i> *	56 <i>b</i>	174 <i>b</i>	405 <i>b</i>	150 <i>a</i>	0,19 <i>a</i>
2 de 2	100	1815 <i>a</i>	72 <i>a</i>	298 <i>a</i>	679 <i>a</i>	143 <i>b</i>	0,09 <i>b</i>
1 de 3	45	1368 <i>b</i>	58 <i>b</i>	171 <i>c</i>	419 <i>b</i>	144 <i>a</i>	0,12 <i>a</i>
2 de 3	65	1906 <i>a</i>	75 <i>a</i>	306 <i>a</i>	719 <i>a</i>	134 <i>a</i>	0,07 <i>b</i>
3 de 3	54	1481 <i>b</i>	61 <i>b</i>	247 <i>b</i>	524 <i>b</i>	161 <i>a</i>	0,12 <i>a</i>
1 de 4	29	1417 <i>c</i>	60 <i>c</i>	174 <i>b</i>	405 <i>b</i>	132 <i>a</i>	0,11 <i>a</i>
2 de 4	63	1693 <i>b</i>	68 <i>b</i>	280 <i>a</i>	583 <i>b</i>	165 <i>a</i>	0,11 <i>a</i>
3 de 4	37	2016 <i>a</i>	79 <i>a</i>	326 <i>a</i>	839 <i>a</i>	106 <i>a</i>	0,05 <i>b</i>
4 de 4	35	1231 <i>c</i>	52 <i>c</i>	177 <i>b</i>	409 <i>b</i>	164 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
1 de 5	60	1713 <i>b</i>	69 <i>b</i>	284 <i>b</i>	590 <i>b</i>	163 <i>a</i>	0,10 <i>a</i>
2 de 5	23	1211 <i>c</i>	52 <i>c</i>	177 <i>c</i>	407 <i>b</i>	179 <i>a</i>	0,15 <i>a</i>
3 de 5	10	1298 <i>c</i>	56 <i>c</i>	143 <i>c</i>	334 <i>b</i>	139 <i>a</i>	0,12 <i>a</i>
4 de 5	36	2027 <i>a</i>	79 <i>a</i>	329 <i>a</i>	842 <i>a</i>	106 <i>b</i>	0,05 <i>b</i>
5 de 5	35	1395 <i>b</i>	58 <i>c</i>	188 <i>c</i>	441 <i>b</i>	138 <i>a</i>	0,11 <i>a</i>
1 de 6	20	1110 <i>c</i>	48 <i>c</i>	156 <i>c</i>	364 <i>b</i>	177 <i>a</i>	0,16 <i>a</i>
2 de 6	20	2095 <i>a</i>	81 <i>a</i>	355 <i>a</i>	982 <i>a</i>	76 <i>b</i>	0,04 <i>b</i>
3 de 6	33	1419 <i>b</i>	59 <i>b</i>	193 <i>c</i>	449 <i>b</i>	138 <i>b</i>	0,11 <i>a</i>
4 de 6	26	1602 <i>b</i>	65 <i>b</i>	282 <i>b</i>	600 <i>b</i>	165 <i>b</i>	0,12 <i>a</i>
5 de 6	11	1359 <i>c</i>	58 <i>b</i>	153 <i>c</i>	348 <i>b</i>	135 <i>b</i>	0,12 <i>a</i>
6 de 6	54	1814 <i>a</i>	72 <i>a</i>	285 <i>b</i>	605 <i>b</i>	157 <i>b</i>	0,09 <i>a</i>

* Pour chaque stratégie de stratification (2, 3, 4, 5 et 6 zones), les zones présentant la même lettre ne sont pas significativement différentes en moyenne selon le test de comparaison multiple de Scheffe (P=0,05).

6.3 Conclusion

Cette étude démontre que la conductivité électrique apparente du sol, les données spectrales de l'image IKONOS, ainsi que les indices spectraux dérivés de cette image tels que SAVI peuvent être utilisés conjointement à l'élévation extraite du MNE efficacement pour délimiter à l'intérieur des parcelles des zones d'aménagement aux propriétés homogènes et contrastantes les unes par rapport aux autres. Ces variables auxiliaires que nous avons aussi appelés des stratificateurs ont été utilisés selon une méthode de classification floue non dirigée à « C- moyenne » ou « K- moyenne ». Le gain obtenu sur la précision est associé à la stratégie de stratification liée à la force de la relation existant entre les indicateurs de la capacité de fixation du phosphore et les stratificateurs (voir les coefficients de corrélation de Pearson présentés au Tableau 16) sur lesquels est basé la segmentation des parcelles en ZA utilisées pour la gestion spécifique des intrants à base de phosphore. Les données de la CEA (VERIS 3100 à 0-30 cm) et l'indice SAVI krigé ont été d'une façon générale plus efficace pour la segmentation des champs en ZA comparativement aux autres stratificateurs utilisés dans cette étude. Pour des raisons de pratiques agricoles (profondeur de labours, profondeur des racines de plantes commerciales comme le maïs, le canola, la pomme de terre, le tournesol, le soya), on peut penser que les données du VERIS 3100 (0-30 cm) seraient plus efficaces pour stratifier le champ en unités de gestion aux propriétés pédologiques et homogènes. À une profondeur de 100 cm (VERIS) et 130 cm (Geonics EM-38), on peut estimer que la CEA aurait plus tendance à caractériser les propriétés pédogénétiques des horizons B ou C des sols. Cependant, les données de la CEA à 130 cm de la surface du sol (Geonics EM 38) ont également été efficaces pour définir et délimiter des ZA et caractériser la variabilité spatiale et temporelle des rendements de la pomme de terre et des propriétés de sol (Cambouris *et al.*, 2006). L'efficacité des variables auxiliaires dans la stratification des parcelles dépend de leur relation avec les propriétés responsables du processus à l'étude. Dans l'étude de Cambouris *et al.* (2006), le rendement en pomme de terre et la réponse des sols à l'apport d'intrants à base de N dépendaient d'une part de la profondeur et de la nature du substratum contrastant située sous la surface cultivable (>75 cm) et d'autre part de la teneur en matière organique, la teneur en argile, de l'état hydrique du sol, du taux d'humidité du sol et de la qualité du drainage. Plusieurs de ces informations pédologiques sont fortement reliées à la CEA mesurée en profondeur.

Par ailleurs, la courte période de temps disponible dans les contextes pédo-climatiques du Québec et de l'Est du Canada pour l'acquisition des données de CEA, le temps alloué au traitement de ces données par un SIG pour la cartographie sont tous des facteurs qui limitent l'utilisation efficace de la CEA sur une grande étendue de surface et sur une longue période de temps. Par exemple, dans les champs de maïs, la période d'acquisition des données de la CEA est très courte au printemps après le dégel des sols et tout de suite avant le semis ou bien à l'automne après les récoltes et avant le labour. Pour les prairies, les pâturages et les champs de graminées, une période de temps plus longue favorise l'acquisition des données de la CEA (par exemple au printemps et après la première, la deuxième ou la troisième coupe de foin. La récolte relativement hâtive des céréales donne aussi plus de latitude pour l'acquisition des données de CEA.

Pour éviter toutes ces restrictions liées à la collecte et à l'usage de la CEA dans le domaine agro-pédologique, les données spectrales d'image optique de télédétection, les données d'image multispectrale aéroportée constituent une alternative et une association efficace et intéressante (peu coûteuse à la fois) par rapport à la collecte des données de CEA. Cela permet de couvrir rapidement un grand territoire agricole et réduit l'impact lié à l'état de la surface du sol, à la variabilité de l'humidité de surface ainsi qu'à la variabilité de l'humidité dans les profondeurs (horizon B et horizon C).

On peut améliorer l'efficacité des données de télédétection pour la délimitation des ZA dans les champs agricoles si l'on dispose des données de bandes spectrales de très grande résolution au sol (4 m par exemple pour le capteur IKONOS) et qui seraient liées aux indicateurs de la CFP ou aux propriétés de sols identifiés dans les diagnostics agronomiques et agro-environnementaux. Cependant, le désavantage des données provenant d'images satellitaires demeure la sensibilité des capteurs aux conditions climatiques et atmosphériques lesquelles ont une grande influence sur la qualité des images acquises. Par exemple, un temps nuageux ou pluvieux, comme on rencontre souvent au printemps, sera probablement peu propice à l'acquisition d'images par satellite ou au moyen d'un avion qui porte une caméra multispectrale ou hyperspectrale), bien que dans ce dernier cas, cela va dépendre de la hauteur du vol et de la couche nuageuse. Cet handicap lié à l'acquisition des données de télédétection engendre un besoin de l'avancement de la recherche sur les données de télédétection dans les conditions de

sol nu. Nous avons constaté que toutes les variables auxiliaires ne donnent pas les mêmes niveaux de précision et les nombres de zones à chaque stratégie (niveau) de stratification.

Certes, l'utilisation des variables auxiliaires possède multiples avantages, toutefois, il convient de mentionner qu'une plus grande précision au niveau des données de variables auxiliaires ou encore au niveau des propriétés des sols (indicateurs de la CFP, texture de sol, taux de matière organique, taux d'argile, etc.) à l'intérieur des ZA n'est pas toujours synonyme d'une plus grande fiabilité et d'utilité de pratique de gestion spécifique ou d'agriculture de précision, car la condition d'une grande variabilité de ces différentes propriétés à l'intérieur des parcelles est aussi nécessaire à l'implantation fructueuse de pratiques de gestion spécifique ou d'agriculture de précision. Évidemment, les aspects économiques, climatiques, l'expérience des producteurs et la connaissance de leur sol, la dynamique des sols sont aussi des facteurs à prendre en compte dans la détermination du nombre optimal de ZA.

Pour les indicateurs $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$, sauf pour la stratégie de stratification utilisant les quatre bandes spectrales du capteur IKONOS (bleu, vert, rouge et PIR) pour lequel on obtient deux zones pour chaque stratégie, tous les autres stratificateurs délimitent trois zones significatives l'une par rapport à l'autre à chaque stratégie de segmentation. Pour l'indicateur $Al_{ox}+Fe_{ox}$, on obtient généralement trois zones significatives l'une de l'autre quelque soit la stratégie de stratification, *i.e.* les variables auxiliaires (stratificateurs) utilisées. Pour l'indice de sorption de phosphore (PSI), les stratificateurs VERIS 3100 (0-30 et 0-100 cm), l'indice SAVI interpolé, le EM-38 (0-150 cm), le VERIS 3100 (0-100 cm), la bande spectrale PIR d'IKONOS et le VERIS 3100 (0-30 cm), on obtient deux zones significativement différentes l'une de l'autre tandis que l'indice SAVI et les bandes spectrales d'IKONOS (bleu, vert, rouge, PIR) permettent de délimiter d'une façon générale trois zones significativement différentes l'une de l'autre dans les champs. La présence d'une ou de deux zones peut s'expliquer par la diminution de la variabilité observée dans les champs par rapport aux indicateurs PSI, P_{M-3} et P_{M-3}/Al_{M-3} .

7. CONCLUSION GENERALE

Cette étude doctorale, débutée à l'automne 2005, avait pour objectif de cartographier à l'échelle de la parcelle agricole quelques indicateurs de la capacité de fixation de phosphore (CFP) à l'aide de variables auxiliaires issues de la télédétection (image optique) et des nouvelles technologies (conductivité électrique apparente du sol et modèle numérique de terrain). Ces travaux de recherche s'inscrivent non seulement dans le domaine de l'agriculture de précision mais encore dans le domaine de la cartographie numérique des propriétés des sols à partir des variables densément mesurées comme la conductivité électrique apparente du sol ou les images satellitaires ou aéroportées.

Plusieurs solutions ont été tentées pour résoudre le problème environnemental du phosphore pourtant essentiel à la nutrition des plantes particulièrement en ce qui concerne les cultures commerciales comme le maïs et la pomme de terre, très exigeantes en éléments fertilisants. La région de Chaudière-Appalaches compte parmi les grandes et intensives régions agricoles du Québec. D'importantes quantités de phosphore ont été introduites dans les agro-écosystèmes sous forme de fumier, lisier de porc ou d'engrais phosphatés. Le bassin versant de la rivière du Bras d'Henri, où se déroule la présente étude, constitue un cas typique de cette région agricole. Une solution au problème de pertes de phosphore dans l'environnement passe par une gestion rationnelle et précise des intrants à base de phosphore, en particulier le fumier et le lisier, tenant compte de la CFP des sols et du degré de saturation des sols en phosphore. La cartographie numérique des indicateurs de la CFP à l'échelle du bassin versant ou même de la parcelle fournit donc une couche d'information essentielle à une gestion rationnelle et précise des intrants à base de P. Une telle approche repose au préalable sur l'étude et la description de la variabilité spatiale des indicateurs de la CFP à l'échelle de la parcelle pour y diagnostiquer la présence de structures spatiales.

Les résultats de notre étude ont montré que les quatre indicateurs de la CFP (Al_{M-3} , $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$, $Al_{ox}+Fe_{ox}$, PSI) présentent tous des structures spatiales permettant de les interpoler par krigeage et co-krigeage traités par le module «*Geostatistical Analyst*» de ArcGIS 9 (ESRI, 2003). Pour chaque indicateur de la CFP étudié, une erreur moyenne d'estimation a été calculée afin d'évaluer la précision et la fiabilité de l'interpolation. L'indicateur Al_{M-3} s'est révélé, dans les

parcelles à l'étude, celui présentant des structures spatiales les mieux définies tel que diagnostiqué à partir des paramètres issus de l'analyse variographique, en particulier le ratio C/C_0+C . C'est donc l'indicateur de premier choix à utiliser pour cartographier la capacité de fixation de phosphore des sols à l'échelle de la parcelle. C'est par ailleurs, l'indicateur proposé pour suivre le taux de saturation des sols en P ($P_{sat}=P_{M-3}/Al_{M-3}$). Il est donc déjà inclus dans les analyses de routine effectuées pour renseigner les producteurs sur la fertilité de leur sol.

L'agriculture de précision propose une gestion à taux variable des intrants basée sur la connaissance de la variabilité des sols acquise suite à un échantillonnage intensif des sols. Cependant, le nombre d'échantillons requis pour réaliser une cartographie numérique fiable des propriétés de sol, comme les indicateurs de la CFP, peut s'avérer trop élevé pour justifier une telle approche sur le plan économique. Cette recherche nous a donc amené à évaluer par le biais de l'étude de la stratégie d'échantillonnage le nombre d'échantillons nécessaire à la prédiction et à la cartographie numérique de l'indicateur Al_{M-3} de même que pour les trois autres indicateurs de la CFP. La stratégie d'échantillonnage recommandée en agriculture de précision consiste à prendre un échantillon par hectare. À des fins de recherche, nous avons utilisé une densité d'échantillonnage beaucoup plus élevée, soit 11 échantillons par ha. Nous nous sommes assurés de la représentativité de tous les échantillons et sous-échantillons prélevés dans les trois champs à l'étude. Nous avons par ailleurs grâce à l'interpolation par krigeage et co-krigeage (utilisation des variables auxiliaires dans l'interpolation) des données relatives à Al_{M-3} calculer l'erreur standard moyenne (ESM) afin de déduire l'impact de la taille sur la précision de l'erreur d'interpolation.

Il appert que la conductivité électrique apparente du sol, une variable densément mesurée par le EM-38 à une profondeur de 130 cm sous de la surface du sol (co-krigeage anisotrope) s'est avérée la variable auxiliaire la plus efficace à réduire l'erreur d'interpolation standard moyenne par co-krigeage relativement à l'interpolation de Al_{M-3} par krigeage simple anisotrope. Les résultats ont montré que la densité d'échantillonnage minimale requise dans le contexte de notre étude est de 5,2 échantillons par hectare, ce qui dépasse de beaucoup la norme d'un échantillon par hectare utilisée par l'industrie. Par ailleurs, presque toutes les moyennes de l'indicateur Al_{M-3} tournent autour de 250 mg kg^{-1} , correspondant à une demie classe du système de classification de la CFP à partir de Al_{M-3} utilisé dans les grilles de fertilisation utilisées au Québec (CRAAQ, 2003). Il ressort donc de cette étude que l'erreur d'interpolation de

l'indicateur Al_{M-3} est trop élevée pour appuyer une gestion modulée des intrants à base de P sur une base continue (*site specific crop management*). Ainsi, une gestion des intrants par zone de sols aux caractéristiques et comportements homogènes (*soil specific crop management*) nous semble plus appropriée à adopter dans ces parcelles.

Pour cela, nous avons étudié l'efficacité de plusieurs stratégies de stratification des parcelles en zones d'aménagement (ZA) utilisant différentes combinaisons de variables auxiliaires comme stratificateurs. Toutefois, chaque combinaison de stratificateurs étudiée incluait l'élévation extraite du MNE, car cette information est très utile à considérer en agriculture de précision, principalement pour planifier l'aménagement hydraulique des parcelles. L'efficacité de la stratification était évaluée sur la base de la réduction de la variance (RV) des indicateurs de la CFP et de quelques propriétés de sol reliées, RV résultant de la stratification des parcelles en ZA. De plus, pour être utiles, les ZA ainsi délimitées doivent être significativement différentes les unes des autres en termes de CFP et de degré de saturation en P des sols (Psat). L'efficacité des différentes stratégies de stratification étudiées était relativement comparable ainsi que les zones délimitées à l'aide de celles-ci.

C'est la CEA mesurée avec le VERIS 3100 à 30 cm de profondeur combinée à l'élévation qui s'est avéré la variable auxiliaire la plus efficace pour réduire la variance des indicateurs de la CFP. Mais, les deux autres mesures de la CEA (VERIS, 0-100 cm et Geonics EM-38 0-130 cm) ainsi que l'information spectrale des images IKONOS se sont avérés également très utiles comme stratificateurs des parcelles en ZA. Or, les données de la CEA peuvent être collectées rapidement et leur coût d'acquisition est relativement abordable, compte tenu qu'il s'agit d'une propriété à ne mesurer qu'une seule fois pour caractériser la variabilité et la pédodiversité des parcelles. De plus, l'utilisation de cette mesure pour stratifier les parcelles en ZA permet de réduire considérablement le nombre d'échantillons de sols à prélever (échantillonnage de 15 à 20 échantillons composite prélevés en zigzag à l'intérieur des ZA). Cependant la fenêtre temporelle d'acquisition de la CEA est plutôt restreinte étant donnée la longueur de la saison de croissance, particulièrement pour le maïs. Les images satellitaires à haute résolution spatiale comme IKONOS ou les images aéroportées offrent une alternative intéressante car elles peuvent être plus facilement acquises au cours du printemps, même une fois les semis réalisés. De plus, elles sont aussi disponibles à moindre coût en archive et celui-ci peut être partagé par

plusieurs agriculteurs (membre du même club agroenvironnemental ou du même organisme de gestion de bassin versant par exemple) car elles couvrent une superficie de 11 km.

D'une façon générale, deux à cinq ZA ont été identifiées par tous les stratificateurs (variables auxiliaires) utilisés dans cette recherche, mais, sur la base du critère de RV, seulement trois zones ont été retenues dans le cas de Al_{M-3} , $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$ et $Al_{ox}+Fe_{ox}$ tandis que deux ZA ont été retenues dans le cas de PSI. Dans le cas de Al_{M-3} , $Al_{M-3}+Fe_{M-3}$ et de $Al_{ox}+Fe_{ox}$, les trois ZA ont démontré une différence significative de la moyenne de CFP. Dans le cas de PSI, PM-3 et PM/AlM-3, lorsque deux ZA sont délimitées, elles sont aussi significatives l'une par rapport à l'autre en moyenne de CFP. De plus, les trois ZA identifiées diffèrent aussi sur le plan de plusieurs propriétés morpho-pédologiques (séries de sol, drainage, ordre de sol, texture de surface, selon une analyse visuelle). Ces différences sont suffisamment importantes pour justifier des pratiques de gestion spécifique au sol comme l'application modulée d'intrants à base de P (fumier, lisier et engrais minéral) dans chacune des ZA, notamment dans le cas de la culture du maïs et de la pomme de terre.

Les différences significatives observées au niveau de l'indicateur de sorption de phosphore PSI, au niveau de la richesse du sol exprimée en phosphore extrait par la solution Mehlich-3 (P_{M-3}) et par le ratio P_{M-3}/Al_{M-3} qui exprime le degré de saturation en P des sols montrent que les ZA délimitées à partir des variables auxiliaires présentent des risques différents de pertes à l'environnement par ruissellement, érosion ou écoulement préférentiel jusqu'au réseau de drainage souterrain. Ainsi, la ZA présentant une CFP élevée affiche une valeur moyenne de P_{M-3}/Al_{M-3} généralement inférieure à 10% alors que la ZA où la CFP est la plus faible excède la valeur critique de 10%, requérant alors un épandage moindre ainsi que l'implantation de bonnes pratiques visant à minimiser les pertes à l'environnement (par exemple le fractionnement des apports, l'épandage en post-levée, l'enfouissement). Ainsi la ZA ayant une forte CFP pourrait être gérée différemment à celle ayant une faible ou moyenne CFP. Ceci permettrait de limiter l'accumulation du P dans les sols, l'enrichissement en cet élément autant au niveau de la couche de surface que dans les horizons plus profonds ainsi que son écoulement vers les cours d'eau (rivières, lacs, fleuves). Les précédents culturaux, le taux de saturation et les moments d'application peuvent être pris en compte dans une gestion rationnelle des ZA.

PERSPECTIVES ET NOUVELLES AVENUES DE RECHERCHE

À notre connaissance, cette recherche constitue une innovation dans le monde agricole québécois, car c'est la première à proposer une cartographie de la CFP des sols à l'échelle parcellaire pour guider la gestion modulée des intrants à base de P, plus particulièrement l'épandage du fumier et du lisier. Une telle approche propose une solution pratique à l'échelle de la parcelle au problème de perte de phosphore dans l'environnement.

Deux approches ont été étudiées dans cette thèse. La première consiste en une cartographie numérique de quatre indicateurs de la CFP par les techniques de krigeage et de co-krigeage à l'aide de variables auxiliaires. Cette approche vise une gestion modulée en mode continu des intrants. La seconde approche est basée sur une stratification des parcelles en zones de sols aux caractéristiques et comportements homogènes, désignées zones d'aménagement (ZA). Cette approche vise une application à taux variables des intrants par ZA. Dans les parcelles étudiées, cette dernière approche s'est avérée économiquement plus appropriée (coût de l'échantillonnage moins élevé) que la première, bien que moins précise. Une nouvelle avenue de recherche découlant de nos travaux serait de comparer l'efficacité agronomique (rendement et qualité des récoltes), environnemental (suivi de la qualité des sols et de l'eau) et économique de ces deux modes de gestion des intrants par rapport à une application uniforme traditionnelle.

Il conviendrait également de tester les méthodes développées dans le cadre de cette recherche sous d'autres conditions pédo-climatiques et d'autres types de cultures. Dans la délimitation des zones d'aménagement à partir des variables auxiliaires, toutes les stratégies de stratification étudiées incluaient l'élévation mesurée avec un système RTK. Il serait intéressant de vérifier l'impact de la précision de la méthode étudiée pour mesurer l'élévation sur les résultats de la segmentation. Ainsi, les mesures d'élévation acquises par système DGPS (1 m de précision en mode horizontal et 2-3 m en mode vertical) parallèlement à la mesure de la CEA avec le Geonics EM-38 ou le VERIS 3100, bien que moins précises pourraient générer les mêmes groupements ce qui réduirait le coût d'acquisition des variables auxiliaires. De même, l'acquisition de données topographiques à partir d'autres technologies comme le LIDAR pourraient être étudiée comme variable auxiliaire. Il serait également pertinent d'étudier l'impact de la stratification des parcelles en ZA sur les autres propriétés du sol utilisées dans la gestion des intrants (texture, matière organique, pH, éléments fertilisants Ca, Mg et K) ainsi que

pour les propriétés reliées au régime hydrique du sol (réserve en eau utile, drainage, perméabilité, etc.).

Nos résultats ont démontré l'intérêt de la télédétection optique dans la cartographie de la CFP des sols à l'échelle de la parcelle. Il s'agit là d'une propriété très utile à prendre en considération dans un plan de gestion agro-environnemental. Il serait pertinent de tester cette approche à des échelles plus globales, comme à l'échelle du bassin versant, de la région agricole et même à l'échelle nationale. L'accès gratuit aux nombreuses images Landsat-5 et Landsat-7 disponibles en archive depuis quelques mois ouvre une avenue de recherche très intéressante à explorer en ce sens. Les images ASTER étudiées dans cette thèse pourraient aussi être utilisées à cette fin car leur résolution spatiale de 15 m x 15 m serait mieux adaptée à des échelles plus petites (par exemple 1 :20 000, 1 :40 000 et 1 :50 000) qu'à l'échelle de la parcelle ($\geq 1 :10\ 000$). Une telle démarche s'inscrirait bien dans le nouveau projet de carte numérique des sols du monde qui sera réalisée à une résolution spatiale de 90 m x 90 m, soit le projet *GlobalSoilMap.net* qui a été lancé au début de mars 2009 par la communauté internationale de science du sol.

Outre la gestion modulée des intrants, la délimitation de ZA à l'aide des variables auxiliaires peut également servir à l'implantation de bonnes pratiques de conservation des sols, laquelle s'appuie, lorsque disponible, sur les cartes très détaillées des sols. Une autre avenue de recherche consisterait à comparer les résultats de la stratification générée par le logiciel MZA utilisé dans notre recherche avec d'autres logiciels de segmentation disponibles sur le marché comme FuzMe, LandMapR et SOLIM. Avec l'émergence des technologies de l'information et des données de télédétection de plus en plus précises tant sur le plan de la résolution spatiale que spectrale (images hyperspectrales), la cartographie numérique des propriétés de sols comme celle réalisée dans cette thèse remplacera peu à peu les méthodes traditionnelles de prospection pédologique, bien que l'échantillonnage et les mesures au champ devront toujours permettre d'en valider les résultats.

Pour ce qui est de l'effet des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau ainsi que l'usage de l'eau, il convient d'implanter des pratiques de réduction de nutriments (phosphore) à l'échelle de la ferme et à l'échelle des petits cours d'eau. La recherche sur la qualité de l'eau à l'échelle des

petits cours d'eau, et des ruisseaux à l'échelle de la ferme permettrait de réduire la pollution de l'eau à la source avant son ruissellement jusqu'au grand réseau hydrographique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel-Hamid, M.A. 1993.** Surface soil reflectance as a criterion of soil classification related to some physical and chemical soil properties. *Egypt. J. Soil Sci.*, **33**(2): 149-162
- Abrams, M. Hook, S. et Ramachandran, B. 2005,** Aster User Handbook, version 2. 135 p.
- Agbu, P.A., Fehrenbacher, D.J. et Jansen, I.J. 1990.** Soil property relationship with SPOT satellite digital data in east central Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54**: 807-812.
- Al-Shankiti, A. 2000.** Phosphorus forms and retention in a sandy soil receiving dairy waste effluent. PhD thesis. Gainesville, Flor, :Univ. Florida. 13 p.
- Armstrong, M. et Carignan, J. 1997.** Géostatistique linéaire. Application au domaine minier. Les presses de l'École des mines. Paris. 115 p.
- Bache, B.W. et Williams, E.G. 1971.** A phosphate sorption index for soils. *J. Soil. Sci.*, **22**: 289-301.
- Bajwa, S. G. et Tian, L.F. 2005.** Soil fertility characterization in agricultural fields using hyperspectral remote sensing. *Tran. ASABE*, **48**(6): 2399-2406.
- Ballard, R. et Fiskell, J.G.A. 1974.** Phosphorus retention in coastal plain forest soils: I. Relation to soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **38**: 250-255.
- Banton, O., Seguin, M.K. et Cimon, M.A. 1997.** Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.*, **61**: 1010-1017.
- Baril, R. et Rochefort, B.. 1957.** Étude pédologique du comté de Lotbinière dans la province de Québec. Service des fermes expérimentales, Ministère fédéral de l'Agriculture, en collaboration avec le ministère de l'Agriculture de Québec et l'École supérieure d'Agriculture, Ste-Anne-de-La-Pocatière. 115 p.

- Baril, R.W. et Tran, T.S. 1977.** Étude sur la valeur des critères chimiques proposés par la Commission Pédologique du Canada pour la classification taxonomique des sols du Québec. *Can. J. Soil Sci.*, **57** : 233-247.
- Barnes, E.M. et Baker, M. 2000.** Multispectral data for mapping soil texture: possibilities and limitations. *Applied Eng. Agric.*, **16**(16): 731-741.
- Baumgardner, M.F., Silva L.F., Biehl, L.L. et Stoner, E.R. 1985.** Reflectance properties of soils. *Adv. in Agron.*, **38**: 1-44.
- Batten, G.D. 1998.** Plant analysis using near infrared reflectance spectroscopy: the potential and the limitations. *Austr. J. Exp. Agric.*, **38** : 697–706.
- Beauchemin, S. 1996.** Évaluation du risque de lessivage du phosphore dans les sols agricoles. Thèse de doctorat. Institut National de Recherche Scientifique, INRS-EAU. Université du Québec. 154 p.
- Beauchemin, S. et Simard, R.R. 1999.** Degré de saturation en P du sol: revue de quelques indices et leur utilité pour la gestion du P au Québec, Canada. *Can. J. Soil Sci.*, **79** : 615-625.
- Beauchemin, S., Simard, R.R., Bolinder, M.A., Nolin, M.C. et Cluis, D. 2003.** Indicator of risk of water contamination by P for Soil Landscape of Canada polygons. *Can. J. Soil. Sci.* **80**: 153-163.
- Beckett, P.H.T. et Webster, R. 1971.** Soil variability : a review. *Soil Fertilizers*, **34** : 1-15.
- Belzile, K. 2005.** Comparaison pédologique et culturale des deux microbassins du projet ÉPPBH et leur comportement dans la sorption/désorption du P au niveau du sol et de l'eau. Rapport de stage. Agriculture et Agro-alimentaire Canada et Université Laval. 69 p.
- Ben-Dor, E. 2002.** Quantitative remote sensing of soil properties. *Adv. Agron.*, **75**: 173-243.
- Ben-Dor, E. et Bannin, A. 1995.** Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.*, **59**: 364-372.

- Ben-Dor, E., Goldshleger, N., Benyamini, Y., Agassi, M. et Blumberg, D. 2003.** The spectral reflectance properties of soil's structure crust in the SWIR spectral region (1.2-2.5µm). *Soil. Sci. Soc. Amer. J.*, **67**: 289-299.
- Bernier, B. et Carrier, J.L. 1968.** Étude sur l'extraction du fer et de l'aluminium libres dans les sols podzolisés. *Naturaliste Can.*, **95** : 247-257.
- Bezdek, J.C. 1981.** Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. Plenum Press, New York.
- Bogrekci, I. et Lee, W.S. 2005a.** Improving phosphate sensing by eliminating soil particle size effect in spectral measurement. *Trans. ASABE*, **48(5)**: 1971-1978.
- Bogrekci, I. et Lee, W.S. 2005b.** Spectral measurement of common soil phosphates. *Trans. ASABE*, **48(6)**: 2371-2378.
- Bogrekci, I., Lee, W.S. et Herrera, J. 2004.** Spectral signatures for Lake Okeechobee soils using UV-VIS-NIR spectroscopy and predicting phosphorus concentrations. ASABE Paper No. 041076. St. Joseph, Mich. ASAB. 7 p.
- Bonneau, M. et Souchier, B. 1979.** Pédologie. Constituant et propriétés du sol. Masson, Paris. 459 p.
- Bossé, C. 2007.** Étude agroenvironnementale à l'échelle de la parcelle et du microbassin versant. Rapport de stage. Univ. Laval et Agriculture et Agroalimentaire Canada. 97 p.
- Bossé, C., Perron, I., Nolin, M.C., Martin, A., Lamontagne, L. et Ka, O. 2007.** Cartographie et interprétation des sols à l'échelle du microbassin versant agricole, rivière Bras d'Henri (Québec). Page 43 dans Congrès annuel de l'association québécoise des spécialistes en science du sol (AQSSS) et Société canadienne de la science du sol (SCSS) – programme scientifique et résumé.

- Bonn, F. et Escadafal, R. 1996.** La télédétection appliquée aux sols. Pages 92-136 dans Bonn F. PUQ/AUPELF, Québec. Précis de télédétection. Volume 2. Applications thématiques. Éd. Presses de l'Université du Québec.
- Bouma, J., Stoorvogel, J., Van Alphen, B.J et Booltink, H.W.G. 1999.** Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agriculture research. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **63**: 1763-1768.
- Boydell, B. et McBratney, A.B. 1999.** Identifying potentiel within-field management zones from cotton yield estimates. Pages 331-341. dans J.V. Stafford (ed). Precision agriculture 99. Proc.European Conf. on Precision Agric., 2nd, Odense Congress Cent., Denmark. 11-15 july 1999. SCI, London.
- Boyer, D.G, Wright, R.J., Feldhake, C.M., et Blight, D.P. 1996.** Soil spatial variability relationships in a stepey sloping acid environment soil Sci., 161 (5): 228-282.
- Breeuwsma, A. et Reijerink, J. G.A. 1992.** Phosphate satured soil: A “new” environmental issue. Pages 79-85 dans G.R.B. ter Meulen *et al.* eds. Chemical time bombs, porc. Of the European State-of the-Art Conference on Delayed effects of chemicals in coils and sediments, veldhoven, The Netherlands. 1992. Sep. 02-05. Foundation for Ecodevelopment “Stichting Mondial Alternatief”, Hoofddorp, the Netherlands.
- Breeuwsma, A. et Silva, S. 1992.** Phosphorus fertilization and environmental effects in the Netherlands and the Po region (Italy). Agric. Res. Dep. Rep. 57, Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil, and Water Res., Wageningen, the Netherlands.
- Breeuwsma, A., Reijerink, J.G.A. et Schoumans, O.F. 1995.** Impact of manure on accumulation and leaching of phosphate in areas of intensive livestock farming. Pages 239-251 dans K. Steele, ed. Animal waste and the land water interface. Lewis Publishers-CRC, New York, NY.
- Brisco, B., Brown, R.J., Hirose, T., McNairn, H. et Staenz, K. 1998.** Precision agriculture and the role of remote sensing: A review. *J. Can. Télédétection*, **24**: 315-327.

- Buol, S.W., Hole, F.D. et McCracken, R.J. 1989.** Soil Genesis and Classification, 3rd edition: Iowa State University Press, Ames. 446 p.
- Burrough, P.A. 1983a.** Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *J. Soil Sci.*, **34**: 577-598.
- Caloz, R. 1994.** Télédétection satellitaire. Cours photocopiés EPFL, Lauzanne, EPFL. 131 p.
- Cambouris, A.N. 2007.** Impact des zones d'aménagement des sols délimitées à l'aide de la conductivité électrique sur la gestion de l'azote dans les cultures de terre. Thèse de doctorat. FSAA.Université Laval, Québec, Canada. 153 p.
- Cambouris, A.N, Nolin, M.C, Zebarth, B.J et Laverdière M.R. 2006.** Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and in soil properties. *Amer. J. Potato Res.*, **83**: 381-395.
- Carr, P.M., Carlson, G.R., Jacobsen, J.S., Neilsen, G.A. et Skogley, E.O. 1991.** Farming by soil, not by fields: a strategy for increasing fertilizer profitability. *J. Prod. Agric.*, **4**: 57-61.
- Carter, M.R. 1993.** Soil sampling and methods of analysis CSSS, Lewis Publishers. Boca Raton, Fl. 823 p.
- Chaplot V., Walter C. et Curmi P., 2000.** Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data. *Geoderma*, **97**: 405-422.
- Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. et Hurburgh, C.R. Jr. 2001.** Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analysis of soil properties. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **65**: 480-490.
- Chikhaoui, M., Bonn, F. et Merzouk, A. 2004.** Cartographie de la fraction argileuse du sol dans le Rif marocain à l'aide du capteur ASTER et de l'analyse géostatistique. *Revue internationale de géomatique*, **14**(3-4): 259-377.

- Chikhaoui, M., Bonn, F. Bokoye, A.I. et Merzouk, A. 2006.** Comparaison des capteurs ASTER et ETM⁺ pour la cartographie de la dégradation des sols à l'aide de l'indice LDI. *Can. J. Remote Sensing*, **32**(2): 74-83.
- Chilès, J.P. et Delfiner, P. 1999.** Geostatistics: Modeling spatial uncertainty. Wiley Series in Probability and Statistics. J. Wiley & Sons Inc. New York, USA. 695 p.
- Clay, D.E., Malo, D.D., Reese, C. et Carlson, C.G. 2000.** Identifying good candidates for precision phosphorus management. SSMG-13. Dans Site-Specific Management guidelines Potash & Phosphate Institute (Éds).
[http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/\\$webindex/article=1C3F983A85256966005EBC79CBD550E2](http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/$webindex/article=1C3F983A85256966005EBC79CBD550E2) (site consulté le 17 janvier 2008)
- Clay, D.E., Chang, J., Malo, D.D., Carlson, C.G., Reese, C., Clay, S.A., Ellsbury, M. et Berg, B. 2001.** Factors influencing spatial variability of soil apparent electrical conductivity. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.*, **32**: 2993-3008.
- Coleman, T. L. et Tadesse, W. 1995.** Differentiating soil physical properties from multiple band DOQ data. *Soil Sci.*, **160**(2): 81-91.
- Coleman, T.L., Agbu, P.A., Montgomery, O.L., Gao, T. et Prasad, S. 1991.** Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. *Soil Sci.*, **151**: 355-361.
- Coleman, T.L., Agbu, P.A. et Montgomery, O.L. 1993.** Spectral differentiation of surface soils and soil properties: Is it possible from space platforms? *Soil Sci.*, **155**(4): 283-193.
- Cook, S.E., Corner, G., Grealish, G., Gessler, P.E. et Chartres, C.J. 1996.** A rule based system to map soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**: 1893-1900.
- Condit, H.R. 1970.** The spectral reflectance of american soils, *Photogram. Enr. Rem. Sens.*, **36**: 955-966.

- Condit, H.R. 1972.** Application of characteristic vector analysis to the spectral energy distribution of daylight and the spectral reflectance of american soil. *App. Opt.*, **11**: 74-86.
- Corbridge, D.E.C. 1990.** Studies inorganic chemistry, Phosphorus, An outline of its chemistry, Biochemistry and technology. 4th ed. New York, NY: Elsevier, pp 249- 250.
- Corwin, D.L. et Lesch, S.M. 2003.** Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principle and guidelines. *Agron. J.*, **95**: 455-471.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M., Shouse, P.J., Sophe, R. et Ayars, J.E. 2003.** Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. *Agron. J.*, **95**: 352-364.
- Cozzolino, D. et Moron, A. 2003.** The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyze soil chemical and physical characteristics. *J. Agric. Eng.*, **140**: 65-71.
- CRAAQ, 2003.** Guide de référence en fertilisation. 297 p.
- Dalal, R.C. et Henry, R.J. 1986.** Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near-infrared reflectance spectrophotometry. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **50**: 120-123.
- Dalal, R.C. et Hallasworth, E.G, 1976.** Evaluation of the parameters of soil phosphorus availability factors in predicting yield response and phosphorus uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40**: 541-546.
- Dalsted, K., Paris, J.F., Clay, D.E., Clay, S.A., Reese, C.L. et Chang, J. 2000.** Selecting the appropriate satellite remote sensing product for precision farming. SSMG-40 Dans Site-Specific Management guidelines Potash & Phosphate Institute (Éds)
[http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/\\$webindex/article=A2740B4085256D4E0049F0A9AB5077D3](http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/$webindex/article=A2740B4085256D4E0049F0A9AB5077D3) (site consulté le 17 janvier 2008).
- Daniel, K.W., Tripathi, N.K. et Honda, K. 2003.** Artificial neural network analysis of laboratory and in situ spectra for the estimation of macronutrients in soils of Lop Buri (Thailand). *Aust. J. Soil. Res.*, **41**:47-59.

- Demattê, J.A.M., Demattê, J.L.I., Camargo, W.P., Fiorio, P.R. et Nanni, M.R. 2001.**
Remote sensing in the recognition and mapping of tropical soils developed on topographic sequences. *Mapping Sci. Rem. Sens.*, **38**: 79-102.
- Deutsch, C.V., Journel, A.G. 1998.** GSLIB: Geostatistical Software library and User's guide. Oxford University Press, Oxford, UK. 369 p.
- De Smet, J., Hofman, G., Vanderdeelen, J., Van Meirrenne, M. et Baert, L. 1996.**
Variability of the phosphate saturation degree of the sandy loam soils in West-Flanders, Belgium. *Commun. Soil Plant Anal.*, **27**: 1875-1884.
- Dobos, E., Micheli, E., Baumgardner, M.F., Biehl, L. et Helt, T. 2000.** Use of combined digital elevation and satellite radiometric data for regional soil mapping. *Geoderma*, **97**: 367-391.
- Doerge, T.A. 2000.** Management zone concept. SSMG-2 Dans Site-Specific Management guidelines Potash & Phosphate Institute (Éds)
[http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/\\$webindex/article=375FAC448525695A00559405CF15E6B8](http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/$webindex/article=375FAC448525695A00559405CF15E6B8) (site consulté le 17 janvier 2008).
- Doolittle, J.A., Sudduth, K.A., Kitchen, N.R. et Indorante, S.J. 1994.** Estimating and methods of analysis, pp. 529-540 dans Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Duchaufour, P. 1977.** Pédologie. Pédogénèse et classification. Masson, Paris. 796 p.
- Ehsani, M.R., Upadhyaya, S.K., Fawcett, W.R., Protsailo, L.V. et Slaughter, D. 2001.**
Feasibility of detecting soil nitrate content using a mid-infrared technique. *Trans. ASAE*, **44**(6): 1931-1940.
- Ehsani, M.R., Upadhyaya, S.K., Slaughter, D., Shafii, S. et Pelletier, M. 1999.** A NIR technique for rapid determination of soil mineral nitrogen. *Prec. Agric.* **1**(2): 217-234.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2003.** ArcGIS 9. Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Environmental Systems Research Institute. Redlands, CA, 300 p.

- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2006.** ArcGIS 9. Using ArcGIS Desktop. Environmental Systems Research Institute. Redlands, CA, 435 p.
- Fontes, M.P.F. et Carvalho, I.A. 2005.** Color attributes and mineralogical characteristics, evaluated by radiometry. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, **69**: 1162-1172.
- Freese, D., Van Riemsdijk, W.H. et Van der Zee, S.E.A.T.M. 1995.** Modelling phosphate-sorption kinetics in acid soils. *Eur. J. Soil Sc.*, **46**: 239-245.
- Freese, D., Van der zee, S. E. A. T. M. et Van Riemsdijk, W.H. 1992.** Comparison of different models for phosphate sorption as a function of iron and aluminium oxides of soils. *J. Soil Sci.*, **43**: 729-738.
- Fridgen, J.J., Kitchen, N.R. et Sudduth, K.A. 2000.** Variability of soil and landscape attributes within sub-field management zones. (CD-ROM computer file). Dans P.C. Robert *et al.* (Ed) Proc. 5th Intern. Conf. Prec. Ag. St-Paul, Minnesota.
- Fridgen, J.J., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Drummond, S.T, Wiebold,W.J. et Fraisse, C.W. 2004.** Management Zone Analyst (MZA): Software for subfield management Zone Delineation. *Agron.J.*, **96**: 100-108.
- Galvão, L.S., Vitorello, I. et Formaggio, A.R. 1997.** Relationships of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles. *Remote Sens. Environ.*, **61**: 24-33.
- Gassler, P.E. et Chadwick, O.A. 1997.** Quantitative soil-landscape modeling: A key to linking ecosystem processes on hillslopes. *Pedometrics*. 97^e International workshop. University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, 10-20 Août.
- Gassner, A., et Schnug, E. 2003.** Spatial speciation of phosphorus in agricultural soils. Pages 1-5 dans *Encyclopedia of Soil Science*; Ed. Marcel Dekker, New York.
- Ge, Y. et Thomasson, J.A. 2006.** Wavelet incorporated spectral analysis for soil property determination. *Trans. ASABE*, **49**(6) : 1193-1201.

- Ge, Y., Thomasson, J.A. et Ruixiu, S. 2006.** Remote sensing of soil properties in precision agriculture. A review written for presentation at the 2006 ASABE annual International meeting. Portland Convention Center. Portland, Oregon. 9-12 July, 2006. 7 p.
- Giroux, M. et Tran, T. S. 1996.** Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation en phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrosol*, **9**(2): 51-57.
- Giroux, M., Rivest, R., Leduc, P. et Tran, T.S. 1997.** Comparaison de différentes méthodes d'évaluation de la capacité de fixation et de saturation en phosphore des sols agricoles de Montérégie Est. Colloque AQSSS/ORSTOM, Lac Beauport, 24-28 août, Québec.
- Ge, Y., Thomasson, J.A. et Ruixiu, S. 2006.** Remote sensing of soil properties in precision agriculture. A review written for presentation at the 2006 ASABE annual International meeting. Portland Convention Center. Portland, Oregon. 9-12 July, 2006. Disponible à <http://asae.frymulti.com/request.asp?JID=5&AID=20654&CID=por2006&T=2> (site consulté le 9 novembre 2007).
- Goovarets, P., 1999.** Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, **89**: 1-45.
- Gopala Pillai, S. et Tian, L. 1999.** In field variability detection and spatial yield modeling for corn using digital imaging. *Trans. ASAE*, **42**(6): 1911-1920.
- Groupe de travail sur la classification des sols. 2002.** Système canadien de classification des sols. Troisième édition. Direction générale de la recherche. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Publ. 1646. Ottawa (ON). 196 p.
- Gupta, R. K., Motoghim, S., McClellan, P.W., Alley, M.M. et Brann, D.E. 1997.** Spatial variability and sampling strategies for $\text{NO}_3\text{-N}$, P and K determinations for site-specific farming. *Trans. ASAE*, **40**: 337-343.
- Haneklauss, S., Rühling, I., Schröder, D. Et Schrug, E. 1997.** Studies on the variability of soil and crop fertility parameters and yields in different landscapes of Northern Germany.

- Harrison, A.F. 1987.** Soil organic phosphorus: a review of word literature. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, 652 p.
- Hendershot, W.H., Lalande, H. et Duquette, M. 1993.** Soil reaction and exchangeable acidity. Pages 141-145 dans M.R. Carter, (ed.). Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, Fl.
- Huete, A.R. 1988.** A soil-ajusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, **25**: 295-309.
- Huete, A.R. 1996.** Extension of soil spectra to the satellite: Atmosphere, geometric, and sensor considerations. Photo Interp., **34**: 101-114.
- Hummel, J.W., Gaultney, L.D. et Sudduth, K.A. 1996.** Soil property sensing fro site-specific crop management. Comput. Electron. Agric., **14**: 121-136.
- Hummel, J.W., Sudduth, K.A. et Hollinger, S. 2001.** Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. Computers and Electronics in Agric., **32**: 149-165.
- Hutchinson, J.M.S. 2003.** Estimating near-surface soil moisture using active microwave satellite imagery and optical sensor inputs. Trans. ASABE, **46**(2): 225-236.
- Ige, D.V., Akinremi, O.O., Flaten, D. M., Adiboye, B. et Kashem, M. A. 2005.** Phosphorus sorption capacity of alkaline Manitoba soils and its relationship to soil properties. Can. J. Soil Sci., **85**: 417-426.
- Islam, K., Singh, B. et McBratney, A. 2003.** Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible, and near-infrared spectroscopy. Aust. J. Soil Res. **41**: 1101-1114.
- Janick, L.J., Merry, R.H. et Skjemstad, J.O. 1998.** Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? Aust. J. Exp. Agric., **38**: 681-696.
- Joffe, J.S. 1949.** Pedology. Pedology publications. New Brunswick, N.J., 662 p.

- Jones, Jr., J.B. 1999.** Soil analysis handbook of reference methods. Taylor & Francis, Athens, G.A., 399 p.
- Ka, O., Nolin, M.C., Pattey, E., Cambouris, A.N. et Deschênes, M. 2006.** Stratégie de prétraitement et d'analyse des modèles numériques d'élévation de haute précision avec ArcGIS. Affiche présentée au 20ème Congrès annuel de l'Association Québécoise des Spécialistes en Science du Sol. L'urbanisation et les sols. Montréal du 5 au 8 juin 2006.
- Kaleita, A.L. et Tian, L. 2002.** Remote sensing of site-specific soil characteristics for precision farming. ASABE Paper No. 021078. St. Joseph, Mich. ASABE, 497 p.
- Kaleita, A.L., Tian, L. et Yao. H. 2005.** Soil moisture estimation from remote sensed hyperspectral data. ASABE Paper No. 031047. St. Joseph, Mich. ASABE.
- Kaleita, A.L., Tian, L. et Yao. H. 2005.** Soil moisture estimation from remotely sensed hyperspectral data. ASABE paper No. 031047. St. Joseph, Mich.: ASABE.
- Karlen, D.L., Cambardella, C.A., Jaynes, D.B., Colvin, T.S. et Moorman, T.B. 1997.** Spatial and seasonal factors affecting crop yield and N removal from glacial till soils. Pages 235-242. dans J.V. Stafford, (ed.) Precision Agriculture 1997, Vol. II.. Proceedings of the 1st European. Conference on Precision Agriculture, Warwick, 7-10 septembre 1997. Oxford: BIOS Scientific Publishers Ltd, UK.
- Khaldoune, J. 2006.** Développement d'une méthode de mesure et de cartographie du gel du sol en milieu agricole à l'échelle d'un bassin versant à partir d'images radar monopolarisées (Radarsat-1), multipolarisées (Envisat) et polarimétriques (Radarsat-2/Convoir-580). Thèse de doctorat. Université du Québec. Institut National de Recherche Scientifique, INRS-ETE. Québec, 246 p.
- Khiari, L., Parent, L.E., Pellerin, A., Alimi, A.R.A., Tremblay, C., Simard, R.R. et Fortin, J. 2000.** An agri-environmental phosphorus saturation index for acid coarse-textured soils. J. Environ. Qual., **29**: 1561-1567.

- Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Myers, D.B., Drummond, S.T. et Hong, S.Y. 2005.** Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Comp. Electron. Agric.*, **46**: 285-308.
- Kuo, S., Jellum, E.J. et W.L. Pan. 1988.** Influence of phosphorus sorption parameters of soils on the desorption of phosphate by various extractants. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**:974-979.
- Lamontagne, L. et Nolin, M.C. 1997.** Dossier des noms de sols du Québec. SISCan (Système d'information des sols au Canada). Bulletin d'expertise No 8. Contribution no 971124 du Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures et du Centre de recherches de l'Est sur les céréales et les oléagineux, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ste-Foy, Qc, et Ottawa, On., 58 p.
- Laplante, L. 1963.** Étude pédologique du comté de Lévis, Province de Québec, Ministère de l'Agriculture et de la Colonisation, Bulletin technique no. 10, 86 p.
- Lark, R.M. 2000b.** Estimating variograms of soil properties by the method-of-moments and maximum likelihood. *Eur. J. Soil Sci.*, **55**: 717-728.
- Lark, R.M. et Stafford, J.V. 1997.** Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. *Ann. Appl. Biol.* **130**: 111-121.
- Laverdière, M. et Karam, A. 1984.** Sorption of phosphorus by some surface soils from Québec in relation to their properties. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **15**: 1215-1230.
- Laverdière, M.R., De Kimpe, C. et D'avignon, A. 1981.** Mineralogical and chemical characteristics of some sandy Québec soils regarding their pedological evolution. *Can. J. Soil Sci.*, **61**: 273-283.
- Leclerc, M.L. 1999.** Groupement des sols du Sud-Est de la plaine de Montréal selon leur capacité de fixation du P au moyen des statistiques multidimensionnelles. (Grouping soils from South-East Montreal lowlands according to their P sorption capacity using multivariate statistics.) MSc. Thesis, Université du Québec, INRS-Eau, Qc, 179 p.

- Leclerc, M-L. et Nolin, M.C. 2006.** Effect of within-field pedodiversity on the efficiency of management zone delineation using soil electrical conductivity. 8 th Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, MN, 15 p.
- Leclerc, M.L., Nolin, M.C., Cluis, D. et Simard, R.R. 2001.** Grouping soils of the Montreal Lowlands (Québec) according to fertility and P sorption and desorption characteristics. *Can. J. Soil Sci.*, **81**: 71-83.
- Lee, W.S., Sanchez, J.F., Mylavarapu, R.S. et Choe, J.S. 2003.** Estimating chemical properties of Florida soils using reflectance. *Tran. ASAE*, 46(5): 1443-1453.
- Leinweber, P., Lünsmann, F. et Eckhardt, K.U. 1997.** Phosphorus sorption capacities and saturation of soils in two regions with different livestock densities in northwest Germany. *Soil Use Manage*, 13: 82-89.
- Leon, C. T., Shaw, D.R., Cox, M.S., Abshire, M.J. et Wardlaw III, M.C. 2003.** Utility of remote sensing in precision crop and characteristics. *Prec. Agric.*, **4**: 359-384.
- Lexmond, T.M., Van Riemsdijk, W.H. et Haan de, F.A.M. 1982.** Onderzoek naar fosfaat en koper in de bodem in het bijzonder in gebieden met intensieve veehouderij. Staatsuitgeverij, Den Haag.
- Lesch, S.M., Strauss, D.J. et Rhoades, J.D. 1995.** Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: I. Statistical predictions models: a comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resour. Res.*, **31**: 373-386.
- Lindsay, W.L. 1979.** Chemical equilibria in soils. John Wiley & Son, New York. 448 p.
- Liu, T.L.; Juang, K.W. et Lee, D.Y. 2006.** Interpolating soil properties using kriging combined with categorical information of soil maps. *Soil Sci. Am. J.*, 70: 1200-1209.
- Liu, J., Miller, J.R., Haboudane, D., Pattey, E. and Nolin, M.C. 2005.** Variability of seasonal CASI image data products and potential application for management zone delineation for precision agriculture. *Can. J. of Remote Sensing*, **31**(5): 400-411.

- Liu, J., Pattey, E., Nolin, M.C., Miller, J.R., and Ka, O. 2008.** Mapping within-field soil drainage using remote sensing, DEM and apparent soil electrical conductivity. *Geoderma*, **143**: 261-272.
- Lobell, D.B. et Asner, G.P. 2002.** Moisture effects on soil reflectance. *Soil Sci. Soc. Am.J.*, **66** :722-727.
- Lokell, D.B et Asner, P. 2002.** Moisture effects on soil reflectance. *Soil. Sc. Soc. Amer. J.*, **66**: 722-727.
- Lookman, R., Jansen, K., Merckx, R. et Vlassak, K. 1996.** Relationship between soil properties and phosphate saturation parameters. A transect study in northern Belgium. *Geoderma*, **69**: 265-274.
- Lookman, R., Jansen, K., Merckx, R. et Vlassak, K. 1995a.** Geostatistical assessment of the regional distribution of phosphate sorption capacity parameters (Fe_{ox} and Al_{ox}) in northern Belgium. *Geoderma*, **66**. 285-296.
- Lookman, R., Freese, D., Merckx, R., Vlassak, K. et Van Riemsdijk, W.H. 1995b.** Long-term kinetics of phosphate release from soil. *Environ. Sci. Technol.*, **29**(6): 1569-1575.
- Lozet, J. et Mathieu, C. 1990.** Dictionnaire de Science du sol. Lavoisier; 2^{ème} édition, 384 p.
- Lund, E.D., Wolcott, M.C. et Swinton, S.M. 2001.** Applying nitrogen site-specifically using soil electrical conductivity maps and precision agriculture technology. *The Scientific Word*, **1**(S2): 767-776.
- Madeira Netto, J.S. 1996.** Spectral reflectance properties of soils. *Photo Interprét.*, **2**: 59-70.
- Maguire, R.O. et Sims, J.T. 2002.** Measuring agronomic and environmental soil phosphorus saturation and predicting phosphorus leaching with Mehlich-3. *Soil Soc. Am. J.*, **66**: 2033-2039.

Malley, D.F., Yesmin, L., Wray, D. et Edwards, S. 1999. Application of near-infrared spectroscopy in analysis of soil mineral nutrients. *Commun. Soi. Sci. Plant Anal.*, **30** : 7-8.

Matheron, G. 1967. Les variables régionalisées et leur estimation. Masson, Paris, 600 p.

McBratney, A.B. et Webster, R. 1986. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *J.of Soil Sci.*, **37**: 617-639.

McKeague, J. A. 1967. An evaluation of 0.1 M pyrophosphate and pyrophosphate-dithionite in comparison with oxalate as extractants of the accumulation products in podzols and some other soils. *Can. J. Soil Sci.*, **47**: 95-100.

McKenzie, N.J., Gessler, P.E., Ryan, P.J. et O'Connell, D.A. 2000. The role of terrain analysis in soil mapping. Pages 245-265 dans J.P. Wilson and J.C. Gallant (eds). *Terrain analysis: Principles and applications*. John Wiley & Sons Ltd New York.

Mehlich, A. 1984. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **15**: 1409-1416.

Mendeleev, D. 1877. L'origine du pétrole. *Revue Scientifique*, 2^e, **8** .409-416.

Merry, R.H. et Janik, J. 2001. Mid-infrared spectroscopy for rapid and cheap analysis of soil. Dans *Proc. 10th Austrian agronomy conf.*, CD-ROM. Hobart, Australia. Australian Society of Agronomy.

Ministère de l'Environnement du gouvernement du Québec, 2002a. Bassin versant de la rivière Chaudière. Localisation du bassin de la rivière Chaudière.

Adresse : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/chaudiere/index.htm>
(site consulté le 5 novembre 2007).

Ministère de l'Environnement du gouvernement du Québec, 2002b. Bassin versant de la rivière Chaudière. Pressions exercées sur le milieu.

Adresse : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/chaudiere/index.htm>
(site consulté le 5 novembre 2007).

Ministère de l'Environnement du gouvernement du Québec, 2002c. Bassin versant de la rivière Chaudière. État de l'écosystème aquatique du bassin de la rivière Chaudière – 1996. Le contexte socio-économique du bassin - un survol.

Adresse : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/chaudiere/index.htm>
(site consulté le 5 novembre 2007).

Ministère de l'Environnement du gouvernement du Québec, 2002d. Bassin versant de la rivière Chaudière. État du milieu aquatique. Qualité de l'eau (portrait 1996 - descripteurs conventionnels).

Adresse : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/chaudiere/index.htm>
(site consulté le 5 novembre 2007).

Ministère de l'environnement et de la Faune du Québec. 1998. Gouvernement du Québec, Canada.

Moore, I.D., Gessler, P.E. et Nielson, G.A. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57** : 443-452.

Moore, I.D., Grayson, R.B. et Ladson, A.R. 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological processes*. 5: 3-30.

Moran, M.S., Inoue, Y. et Barnes, E.M. 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sens. Environ.*, **61**: 319-346.

Morra, M.J., Hall, M.H. et Freeborn, L.L. 1991. Carbon and nitrogen analysis of soil fractions using near-infrared reflectance spectroscopy. *Soil Sci. Soc Amer., J.* **55**: 288-291.

Mozaffari, M. et Sims, J.T. 1994. Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture. *Soil Sci.*, **157**: 97-107.

- Mulla, D.J. 1989.** Soil spatial variability and methods of analysis. Pages 241-252 dans L.F. (eds). Soil, crop, and water management systems for rainfed agriculture in the Sudano-Sahelian zone: Proceeding of an international workshop. 7-11 Jan 1987.
- Myers, D.E. 1994.** Spatial interpolation: an overview. *Geoderma*, **62** : 17-28.
- Nanni, M.R. et Demattê, J.A.M. 2006.** Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **70**: 393-407.
- Nolin, M.C. 2000.** Variabilité et structure d'organisation spatiale des sols. Pages 143-169 dans CRAAQ. 1^{er} Colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision. 23-24 Juillet 2000. Ste-Hyacinthe (Québec, Canada).
- Nolin, M.C et Caillier, M.J. 1992a.** La variabilité des sols. Composantes et causes. *Agrosol*, **5**(1) : 15-20.
- Nolin, M.C et Caillier, M.J. 1992b.** La variabilité des sols. II – Quantification et amplitude. *Agrosol*, **5**(1) : 21-32.
- Nolin, M.C. et Caillier, M.J. 1992c.** La variabilité des sols. III. Stratégies d'échantillonnage. *Agrosol*, **5**(1): 69-76.
- Nolin, M.C. et Laflamme G. 1994.** Relation entre la géologie du substratum rocheux des Appalaches et les propriétés physico-chimiques des matériaux de till de la région de l'estrie-Beauce. I- Groupement selon le domaine lithologique. *Agrosol*, **7**(1) : 42-54.
- Nolin, M.C., Lamontagne, L. et Dubé, J.C. 1994.** Cadre méthodologique d'une étude détaillée des sols et son application en terrain plat. Bulletin Technique 1994-4F. Direction générale de la recherche. Agriculture et Agro-alimentaire Canada.
- Nolin, M.C., Lamontagne, L. et Martin, A. 1991.** Esquisse pédologique du sud-est de la plaine de Montréal. *Agrosol*, **4**(2) : 44-57.
- Nolin, M.C., Guertin, S.P. et Wang, C. 1996.** Within-field spatial variability of soil nutrients and corn yield in Montréal lowlands clay soil. Pages 257-270 dans P.C. Robert, H. Rust et

W.E. Larson (eds). Precision agriculture: Proceedings of the 3rd International conference on precision agriculture, 23-26 juin 1996. Madison, WI. ASA-CSSA-SSSA.

Nolin, M.C., Cambouris, A.N. et Simard, R.R. 1997. La variabilité des sols: son origine et sa gestion. Pages 35-77 dans Éditeur (ed.). Actes du Colloque : Nouvelle technologie en agriculture, Campus du fort St-Jean.

Nolin, M.C., Cambouris, A.N. et Deschênes, M.J. 2004. Prospection électrique des sols en mode continu à l'aide du conductivimètre électromagnétique Geonics EM-38. 18^e congrès de l'association Québécoise de spécialiste en sciences du sol (AQSSS). 6-9 juin 2004, Québec (Résumé).

Nolin, M.C., Gagnon, B., Leclerc, M-L., Cambouris, A.N., Bélanger, G. et Simard, R.R. 2002. Influence of pedodiversity and land uses on the within-field spatial variability of selected soil land forage quality indicators. In precision Agriculture, proceedings of the 6th international Conférence, P.C. Robert et al. (Eds.). ASA-CSSA-SSSA. Minneapolis, MN.

Novaes, R.F. et Smith, I.M. 1999. Phosphorus in soil plant in tropical condition. UFV/DPS. Viçosa, Minas-Gerais, Brazil.

Odeh, I.O.A., McBratney, A.B. et Chilleborough, D.J. 1992. Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: Application to classification and soil- landform interrelationships. Soil Sci. Soc. Am.J., **56**: 505- 516.

Odeh, I.O.A., McBratney, A.B. et Chilleborough, D.J. 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-Kriging. Geoderma, **67**: 215-225.

Odhiambo, L.O., Freeland, R.S., Yoder, R.E. et Hines, J.W. 2003. Investigation of fuzzy neural network application in classification of soil using ground-penetration radar imagery. Applied Eng. Agric., **20**(1): 109-117.

- Ouellet, L., Rompré, M., Carrier, D., Laflamme, G. 1995.** Étude pédologique du comté de Beauce, Québec, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 92 p.
- Ortega, R.A. et Santibanez, O.A. 2007.** Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) Computers and Electronics in Agric., **58** : 49-59.
- Pageau, E. 1975.** Étude pédologique du comté de Dorchester, Québec, Division des sols, 94 p.
- Pagé, F. et De Kimpe, C.R. 1987.** Nature des composés ferrugineux et alumineux dans les horizons B podzoliques de sols du Québec en relation avec la présence d'une nappe phréatique. Science du sol, **25**: 145-159.
- Palacios-Orueta, A. et Ustin, S.L. 1998.** Remote sensing of soil properties in the santa Monica Mountains I. spectral analysis. Remote Sens. Environ., **65**: 170-183.
- Paul, S. Depecker, L., Goillot, C. et Lenco, M. 1991.** Introduction à l'étude de la télédétection aérospatiale et son vocabulaire. Éd. La documentation française, Paris. 316 p.
- PCI Geomatica, Enterprises Inc. 2003.** EASI/PACE software, version 9. PCI Geomatics Enterprises Inc., Richmond Hill, Ont.
- Pellerin A., Parent, L.E., Fortin, J. Tremblay, C. Khiari, L. et Giroux, M. 2006.** Environmental Mehlich-III soil phosphorus saturation indices for Québec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. Can. J. Soil Sci., **86**: 711-723.
- Perron, I. 2002.** Influence de la microtopographie sur le rendement des cultures et la qualité des sols. Thèse de Maîtrise. Institut National de Recherche Scientifique, INRS-EAU. Université du Québec. 109 p.
- Perron, I. 2005.** Mise à jour et à niveau de l'information pédologique à l'aide de la télédétection, des capteurs au sol et des modèles numériques d'altitudes. Projet GRIP. Rapport d'étape 2004. Agriculture et Agroalimentaire Canada. 34 p.

- Perron, I., Nolin, M.C., Pattey, E., Smith, A., et Liu, J. 2008.** Delineation of homogeneous soil zones using soil electrical conductivity, multi-polarization sar and hyperspectral data. 9th International Conference On Precision Agriculture. Denver. 20-23 juillet 2008. 16 p. CD-ROM (Abstract_415.pdf).
- Pierce, F.J. et Nowak, P. 1999.** Aspects of precision agriculture. *Adv. Agron.*, **67**: 1-85.
- Pirie, A., Singh, B. et Islam, K. 2005.** Ultra-violet, visible, near-infrared, and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy techniques to predict several soil properties. *Aust. J. Soil Res.*, **43**: 713-721.
- Pote, D.H., Daniel, T.C., Sharpley, A.N., Moore, P.A., Jr., Edwards, D.R. et Nichos, D.J. 1996.** Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**: 855-859.
- Provencher, M. 2003.** Évaluation spatiale de l'efficacité agronomique du LIOR dans la pomme de terre. Thèse de maîtrise. Université. Laval. (Québec). 68 p.
- Provin, T.L. 1996.** Phosphorus retention in Indiana soils. Ph. D. thesis. Purdue University, West Lafayette, IN. 222 p.
- Rivero, R.G; Grunswald, S; et Bruland, G.L. 2007.** Incorporation of spectral data into multivariate geostatistical models to map soil phosphorus variability in a Florida wetland. *Geoderma*, **140**: 428-443.
- Romanenkov, V. 1997.** Application of geostatistical method for analysis of results and designing of field surveys across different landscapes, *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, **85**(3): 1211-1214.
- Ross, G.J. et Wang, C. 1993.** Extractable Al, Fe, Mn et Si. Pages 239-246 dans M.R. Carter, (ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, Fl.
- Salisbury, J.W. et D'Aria, D.M. 1992.** Infrared (8-14 μm) remote sensing of soil particle size. *Remote sens. Environ.*, **42**: 157-157.

- Schepherd, K.D. et Walsh, M.G. 2002.** Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil. Sc. Soc. Am. J.*, **66**: 988-998.
- Schoumans, O.F., Breeuwsma, A. et de Vries, W. 1987.** Use of soil survey information for assessing the phosphate sorption capacity of heavily manured soils. Pages 1079-1088 in (ed.). *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants (VSGP): International conference, Noordwijk Aan Zee, The Netherlands. 30 mars-3 avril 1987.*
- Schwertmann, U. 1993.** Relations between iron oxides, soil color and soil formation. Pages 51-69 dans J.M. Bigham et E.J. Ciolkosz (eds). *Soil color. SSSA Spec. Publ. 31. Madison, WI: SSSA.*
- Searcy, S.W., Schuller, Y.H., Bae, S.C., Borgelt, S.C. et Stout, B.A. 1989.** Mapping of spatially-variable yield during grain combining. *Trans. ASAE*, **3**: 826-829.
- Sharpley, A.N. 1995.** Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *J. Environ. Qual.*, **24**: 920-926.
- Sharpley, A.N. 1996.** Availability of residual phosphorus in manured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**: 1459-1466.
- Sharpley, A.N., Chapra, S. C., Wedepoth, R. Sims, J.T., Daniel, T.C. et Reddy, K.R. 1994.** Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: issues and options. *J. Environ. Qual.*, **23**: 437-451.
- Sheldrick, B. H. et Wang, C. 1993.** Particle size analysis. Pages 499-417 in M.R. Carter, (ed.). *Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.*
- Simard, R. 1983.** Évolution pédogénétique de sols gleysoliques, podzologiques et brunisoliques de la plaine de Montréal. Thèse de maîtrise. FSAA. Univ. Laval. Québec, Canada. 153 p.

- Simard, R. R., Cluis, D. Gangbazo, G., et Beauchemin, S.1995.** P status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *J. Environ. Qual.*, **24**: 1010-1017.
- Simard, R.R., Cambouris, A.N. et Nolin, M.C. 2000.** Spatio-temporal variation of AEM-P in a corn field. Proceedings of the 5th International conference on precision agriculture. Minneapolis. 16-19 Juillet 2000 (cd-rom).
- Sims, J.T., Simard, R.R et Joern, B.C. 1998.** Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *J. Environ. Qual.*, **27**: 277-293.
- Sissingh, H.A. 1971.** Analytical technique of P_w method, used for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands. *Plant Soil*, **34**: 483-486.
- Slaughter, D.C., Pelletier, M.G., et Upadhyaya, S.K. 2001.** Sensing soil moisture using NIR spectroscopy. *Applied Eng. Agric.*, **17**(2): 241-247.
- Smith, J.F., Halvorson, J.J. et Robert, I.P., 1993.** Using multiple variable indicator kriging for evaluating soil quality. *Soil Sci. Soc. Am.*, **57**: 743-749.
- Snyder, C.S., Bruulsema, T.W., Sharpley, A.N. et Beegle, D.B. 2000.** Site-Sécific use of the environmental phosphorus index concept. SSMG-1 Dans Site-Specific Management guidelines Potash & Phosphate Institute (Éds).
[http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/\\$webindex/article=28F949238525695300581E031A2C31B0](http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/$webindex/article=28F949238525695300581E031A2C31B0) (site consulté le 17 janvier 2008).
- Soil Conservation Service 1993.** Proceeding of the National Technical Work-planning Conference of the Cooperative Soil Survey. Washington, D.C. (28 mars – 1 avril 1983).
- Stamatiadis, S., Christofides, C., Tsadilas, C., Samaras, V., Shepers, J.S. et Francis, D. 2005.** Ground-sensor soil reflectance as related to soil properties and response in a cotton field. *Prec. Agric.*, **6**: 399-411.

- Stangeland, D. L., Montross, M.D., Stombaugh, T.S. et Shearer, S.A. 2003.** Use of near-infrared reflectance for soil pH and buffer pH measurement. ASABE Paper No. 031045. St. Joseph, Mich. ASABE.
- Stephens, C. Rasmussen, V.P., Ramsey, R.D. et Whitesides, R.E. 2005.** Using remote sensing to monitor sequestered carbon. 4th annual conference on carbon capture and sequestration. May 2-4, Alexandria, V.A.
- Stoner, E.R. et Baumgardner, M.F. 1980.** Physiochemical, site, and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils, LARS Technical Report 111679, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, IN. 103 p.
- Sudduth, K.A. et Hummel, J.W. 1993.** Portable near-infrared spectrophotometer for rapid soil analysis. Trans. ASAE, **36**(1): 185-193.
- Sudduth, K. A., Kitchen, N.R., Bollero, G.A., Bullock, D.G., et Weibold, W.J. 2003.** Comparison of electromagnetic induction and sensing of soil electrical conductivity. Agron. J. 95: 472-482.
- Sullivan, D.G., Shaw, J.N. et Rickman, D. 2005.** IKONOS imagery to estimate surface soil property variability in two Alabama physiographies. Soil Sci. Soc. Am. J., **69**: 1789-1798.
- SYSTAT Inc. 2004.** SYSTAT[®] 11, Statistics I. SYSTAT Software, Inc. Richmond, CA 94804, USA. 751 p.
- Taylor, M. 2005.** IKONOS planetary reflectance and mean solar exoatmospheric irradiance, Geo Eye. 4 p.
- Tabi, M., Tardif, L. Carrier, D., Laflamme, G et Rompré. M. 1990.** Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport de synthèse. Ste-Foy (QC) : Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Gouvernement du Québec. 71 p.

- Tiessen, H. et Moir, J.O. 1993.** Total and organic carbon. Pages 187-199 dans M.R. Carter, (ed.) Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, Fl.
- Thomasson, J.A., Sui, R., Cox, M.S. et Al-Rajehy, A. 2001.** Soil reflectance sensing determining soil properties in precision agriculture. Tran. ASAE, **44**(6): 1445-1453.
- Tran, T.S. et N'Dayegamiye, A. 1995.** Long-term effects of fertilizers and manure application on the forms and availability of soil phosphorus. Can. J. Soil Sci., **75**: 281-258.
- Tran, T.S. et Simard, R.R. 1993.** Mehlich III- Extractable Element. Pages 43-49 dans M.R. Carter, (ed.). Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, Fl.
- Trangmar, B.B. 1982.** Spatial variability of soil leaf P in a tropeptic eustruck. Benchmark Soils news, 6: 4-5.
- Tran, T.S. et van Lierop, W. 1993.** Lime requirement. Page 109-113 dans M.R. Carter, (ed.). Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, Fl.
- Trangmar, B.B., Yost, R.S. et Uehara, G. 1985.** Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy, **38**: 45-94.
- Van Alphen, B.J. et Stoorvogel, J.J. 2000.** A methodology for precision nitrogen fertilization in high-input farming systems. Prec. Agric., **2**: 319-332.
- Van der Zee, S.E.A.T.M. et Van Riemsdijk, W.H 1986.** Sorption kinetics and transport of phosphate in sandy soil. Geoderma, **38**: 293-309.
- Van der Zee, S.E.A.T.M., Fokking, L.G.J. et Van Riemsdijk, W.H. 1987.** A new technique for assessment of reversibly adsorbed phosphate. Soil Sci. Soc. Am. J., **51**: 599-604.
- Van der Zee, S.E.A.T.M., Nederlof, M.M., Van Riemsdijk, W.H. et Haan de, F.A.M 1988.** Spatial variability of phosphate adsorption parameters. J. Environ. Qual., **17**: 682-688.

- Varvel, G.E., Schlemmer, M.R. et Schepers, J.S. 1999.** Relationship between spectral data from an aerial image and soil organic matter and phosphorus levels. *Prec. Agric.*, **1**(3): 291-300.
- Vézina, L., Carrier, D., Giroux, M., Rompré, M., Laflamme, G. et Moreau, A. 2000.** Proposition de regroupement des sols du Québec selon leur capacité de fixation du phosphore en relation avec leurs caractéristiques pédologiques. *Agrosol.*, **11**(1) : 15-39.
- Viscarra Rossel, R.A. et McBratney, A.B. 1998b.** Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of clay and water content. *Geoderma*, **85**(1): 19-39.
- Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney, A.B., Janick L.J. et Skjemstad J.O. 2006a.** Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, **131**:59-75.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janick L.J., et Skjemstad J.O. 2006b.** Proximal sensing of soils pH and lime requirement by mid infrared diffuse reflectance spectroscopy. Pages 497-508 dans G.Grenier et S. Balckmore, (eds.). Montpellier. ECPA 2001. 3rd European Conference on Prec. Agric., vol. 1. Agro.
- Waiser, T.H., C.L.S. Morgan, D.J. Brown, D.J., and C.T. Hallmark, 2006.** In situ characterization of soil organic and inorganic carbon with visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy (in prep for *Geoderma*)
- Webster, R. 1979.** Quantitative and numerical methods in soil classification and survey. Clarendon Press, Oxford, UK. 269 p.
- Webster, R. 1985.** Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil Sci.*, **3**: 1-70.
- Webster, R. et Olivier, M.A. 1990.** Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford University Press. Oxford. 316 p.

- Webster et McBratney, A.B. 1987.** Mapping soil fertilité at Broom's Born by simple kriging. *J. Soi Food Agric.*, 38: 92-115.
- Williams, B.G. et Hoey, D. 1987.** The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salts and clay contents of soils. *Aust. J. Soil Res.*, 25: 21-27.
- Wilding, L.P. et Drees, L.R. 1983.** Spatial variability and pedology. Pages 83-116 dans L.P. Wilding, N.E. Smeck et G.F. Hall, (eds). *Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions.* Elsevier, Amsterdam.
- Wolkowski, R.P. et Wollenhaupt, N.C. 1994.** Grid soil sampling. *Better Crops with Plant Food*, 78(4): 6-9.
- Yost, R.S., Uehara, G. et Fox, R.L. 1982.** Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas: I. Semi-variograms. *Soil Sci. Soc. Am.*, J. 46: 1028-1032.
- Young, F.J. et Hammer, R.D. 2000.** Soil-landform relationships on a loess-mantled, upland landscape in Missouri. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1443-1454.
- Yuan, G. et Lavkulich, L.M. 1994.** Phosphate sorption in relation to extractable iron aluminium in spodosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 343-346.
- Ziadat, F.M. 2005.** Analyzing digital terrain attributes to predict soil attributes for a relatively large area. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69: 1590-1599.

Sites Internet consultés:

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>

<http://edcdaac.usgs.gov:80/aster/ast14dem.asp>

<http://www.terrainmap.com/rm22.html>

<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/homepg.pl?f>

<http://www.agr.gc.ca>

<http://www.ulaval.ca>

<http://www.mrnf.gouv.qc.ca>

<http://terra.nasa.gov>

<http://edc.usgs.gov/products/satellite.html>

<http://glovis.usgs.gov>

<http://imsweb.aster.ersdac.or.jp/ims/html/MainMenu/MainMenu>

<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/.>

<http://www.educnet.education.fr/orbito/system/ikonos/iko00.htm>

<http://telsat.belspo.be/bEO/fr/satellites/quickbird.htm>

<http://geoeye.com/products/imagery/ikonos/spectral.htm>

ANNEXE

Cas du VERIS 3100 (CEA à 100 cm)

Approche isotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la conductivité électrique apparente mesurée à 100 cm avec le VERIS 3100 en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	262	249	----	----	----	----	262	249	-----	-----
123	75	7,8	296	276	272	244	264	259	277	260	17	16
109	66	7,0	283	270	257	244	268	236	269	250	13	18
82	50	5,2	314	314	240	275	270	235	275	275	37	40
55	33	3,5	308	329	319	294	331	286	319	303	12	23
41	25	2,6	365	300	349	289	384	414	366	334	18	69
33	20	2,1	396	393	390	340	315	270	367	334	45	62
28	17	1,8	430	412	315	288	380	368	375	356	58	63
24	15	1,5	420	414	343	281	475	410	413	368	66	76
21	13	1,3	434	330	379	336	522	554	445	407	72	128

Approche anisotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la conductivité électrique apparente mesurée à 100 cm avec le VERIS 3100 en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	252	234	----	----	----	----	252	234	----	----
123	75	7,8	279	260	260	226	258	236	266	241	12	17
109	66	7,0	261	251	244	233	286	260	264	248	21	14
82	50	5,2	296	278	256	228	269	223	274	243	20	30
55	33	3,5	257	271	286	273	297	241	280	262	21	18
41	25	2,6	350	321	321	268	315	312	329	300	19	28
33	20	2,1	356	352	310	258	253	226	306	279	52	65
28	17	1,8	316	276	286	284	362	344	321	301	38	37
24	15	1,5	342	310	306	267	439	417	362	331	69	77
21	13	1,3	384	305	327	277	458	402	390	328	66	66

Cas du VERIS 3100 (CEA à 30 cm)

Approche isotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la conductivité électrique apparente mesurée à 30 cm avec le VERIS 3100 en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	262	247	----	-----	----	-----	262	247	-----	-----
123	75	7,8	296	268	272	239	263	259	277	255	17	15
109	66	7,0	282	268	259	245	286	258	276	257	15	12
82	50	5,2	314	314	276	238	269	229	286	260	24	47
55	33	3,5	300	323	319	293	330	285	316	300	15	20
41	25	2,6	364	293	350	287	391	418	368	333	21	74
33	20	2,1	394	393	391	327	315	272	367	331	45	61
28	17	1,8	430	413	315	327	381	366	375	369	58	43
24	15	1,5	346	288	343	278	475	399	388	322	75	67
21	13	1,3	434	338	380	333	523	579	446	416	72	139

Approche anisotropie

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la conductivité électrique apparente mesurée à 30 cm avec le VERIS 3100 en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	245	236	---	----	----	----	245	236	-----	----
123	75	7,8	271	261	254	223	250	239	258	241	11	19
109	66	7,0	258	252	234	236	268	233	253	240	17	10
82	50	5,2	282	283	255	225	244	213	260	340	20	37
55	33	3,5	260	286	270	285	294	246	275	272	17	23
41	25	2,6	323	235	322	266	315	307	320	269	4	36
33	20	2,1	348	349	312	265	255	228	305	281	47	62
28	17	1,8	316	279	286	284	391	383	331	315	54	59
24	15	1,5	339	310	304	263	444	420	362	331	73	81
21	13	1,3	380	320	328	272	458	394	389	329	65	61

V Cas de l'image multispectrale aéroportée (bande 1)

Approche isotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 1 (vert) de l'image optique aéroportée multispectrale (OAM) en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	245	253	----	----	----	----	245	253	----	----
123	75	7,8	275	278	259	197	238	161	257	212	19	60
109	66	7,0	261	267	231	256	268	258	253	260	20	6
82	50	5,2	275	334	260	235	239	250	258	273	18	53
55	33	3,5	237	314	291	274	300	299	276	296	34	20
41	25	2,6	289	299	334	269	338	384	320	317	27	60
33	20	2,1	365	365	343	305	293	242	334	304	37	62
28	17	1,8	222	318	291	278	350	360	288	319	64	41
24	15	1,5	307	289	334	281	406	341	349	304	51	33
21	13	1,3	322	335	350	264	417	467	363	355	49	103

Approche anisotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 1 (vert) de l'image optique aéroportée multispectrale (OAM) en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	273	241	-----	-----	-----	-----	273	241	-----	-----
123	75	7,8	295	265	262	205	257	191	271	220	21	39
109	66	7,0	270	252	311	256	271	252	284	253	23	2
82	50	5,2	318	393	264	233	291	250	291	292	27	88
55	33	3,5	304	288	280	281	323	296	302	288	22	8
41	25	2,6	363	323	317	274	350	351	343	316	24	39
33	20	2,1	352	324	271	261	244	220	289	268	56	52
28	17	1,8	278	267	279	287	384	373	314	309	61	56
24	15	1,5	349	336	297	274	427	381	358	330	65	54
21	13	1,3	411	349	293	261	455	480	386	363	84	110

Cas de l'image multispectrale aéroportée (bande 2)

Approche isotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 2 (rouge) de l'image optique aéroportée multispectrale (OAM) en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	246	252	-----	-----	-----	-----	246	252	-----	-----
123	75	7,8	276	281	257	243	243	274	259	266	17	20
109	66	7,0	277	253	235	255	270	263	261	257	23	5
82	50	5,2	280	336	261	233	244	251	262	273	18	55
55	33	3,5	238	296	293	283	304	312	278	297	35	15
41	25	2,6	303	301	340	271	341	384	328	319	22	59
33	20	2,1	373	397	355	315	296	240	341	317	40	79
28	17	1,8	198	301	297	277	354	386	283	321	79	57
24	15	1,5	303	299	337	300	428	358	356	319	65	34
21	13	1,3	356	327	354	271	458	465	389	354	59	100

Approche anisotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 2 (rouge) de l'image optique aéroportée multispectrale (OAM) en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	284	245	----	----	----	----	284	245	----	----
123	75	7,8	306	272	282	244	291	255	293	257	12	14
109	66	7,0	262	265	318	264	278	259	286	263	29	3
82	50	5,2	327	303	272	237	300	259	300	266	28	34
55	33	3,5	304	288	288	283	332	299	308	290	22	8
41	25	2,6	372	332	319	269	358	374	350	325	27	53
33	20	2,1	376	347	277	278	352	234	302	286	66	57
28	17	1,8	273	262	288	281	386	388	316	310	61	68
24	15	1,5	345	332	298	279	431	417	358	343	67	70
21	13	1,3	413	362	295	272	459	507	389	380	85	119

Cas des 4 bandes de l'image IKONOS

Approche isotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 1 (bleu) de l'image IKONOS en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	268	254	----	----	----	----	268	254	----	----
123	75	7,8	300	279	275	246	272	265	282	263	15	17
109	66	7,0	286	276	263	248	292	263	280	262	15	14
82	50	5,2	319	323	276	241	277	240	291	268	25	48
55	33	3,5	433	375	323	299	340	304	365	326	59	43
41	25	2,6	321	370	345	290	399	411	355	357	40	62
33	20	2,1	103	404	402	466	315	277	373	382	51	96
28	17	1,8	430	412	316	283	380	384	375	360	57	68
24	15	1,5	420	414	344	280	487	467	417	387	72	96
21	13	1,3	440	415	342	333	524	517	435	422	91	92

Approche anisotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 1 (bleu) de l'image IKONOS en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	262	238	----	----	----	----	262	238	----	----
123	75	7,8	288	264	233	265	265	240	274	246	13	16
109	66	7,0	267	253	233	273	273	243	262	243	15	10
82	50	5,2	302	283	232	279	279	236	281	250	21	28
55	33	3,5	317	310	280	258	258	303	288	298	30	16
41	25	2,6	359	335	279	317	317	304	332	306	23	28
33	20	2,1	378	374	253	252	252	236	312	288	63	75
28	17	1,8	317	282	280	390	390	372	331	311	53	53
24	15	1,5	342	310	273	442	442	442	363	342	71	89
21	13	1,3	396	437	273	457	457	402	391	371	69	86

Approche isotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 2 (vert) de l'image IKONOS en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	281	401	----	----	----	----	281	401	----	----
123	75	7,8	300	279	275	246	272	265	282	263	15	17
109	66	7,0	286	276	263	248	292	263	280	262	15	14
82	50	5,2	319	323	276	241	277	240	291	268	25	48
55	33	3,5	433	375	323	299	340	304	365	326	59	43
41	25	2,6	321	370	345	290	399	411	355	357	40	62
33	20	2,1	403	404	402	466	315	277	373	382	51	96
28	17	1,8	430	412	316	283	380	384	375	360	57	68
24	15	1,5	420	414	344	280	487	467	417	387	72	96
21	13	1,3	440	415	342	333	524	517	435	422	91	92

Approche anisotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 2 (vert) de l'image IKONOS en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	254	237	----	----	----	----	254	237	----	----
123	75	7,8	288	264	268	233	265	240	274	246	13	16
109	66	7,0	267	253	245	233	273	243	262	243	15	10
82	50	5,2	302	283	261	232	279	236	281	250	21	28
55	33	3,5	317	310	288	280	258	303	288	298	30	16
41	25	2,6	359	335	320	279	317	304	332	306	23	28
33	20	2,1	378	374	305	253	252	236	312	288	63	75
28	17	1,8	317	282	287	280	390	372	331	311	53	53
24	15	1,5	342	310	304	273	442	442	363	342	71	89
21	13	1,3	396	437	320	273	457	402	391	371	69	86

Approche isotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 3 (rouge) de l'image IKONOS en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	408	281	----	----	----	----	408	281	----	----
123	75	7,8	425	314	429	312	429	312	413	299	24	24
109	66	7,0	429	307	399	296	399	296	410	302	16	6
82	50	5,2	460	370	409	306	409	306	412	314	47	52
55	33	3,5	434	377	388	355	388	355	374	345	68	37
41	25	2,6	459	401	319	273	319	273	386	329	70	65
33	20	2,1	429	401	253	231	253	231	352	311	90	86
28	17	1,8	430	413	421	413	421	413	385	372	71	70
24	15	1,5	420	414	489	471	489	471	412	389	82	96
21	13	1,3	439	415	524	517	524	517	454	428	63	84

Approche anisotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 3 (rouge) de l'image IKONOS en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	257	238	----	----	----	----	257	238	----	----
123	75	7,8	283	263	265	230	262	240	270	244	11	17
109	66	7,0	264	254	247	234	271	239	261	242	12	10
82	50	5,2	298	283	259	229	275	229	277	247	20	31
55	33	3,5	316	312	288	277	298	246	301	278	14	33
41	25	2,6	353	323	381	314	319	273	351	303	31	27
33	20	2,1	357	366	253	231	372	316	327	304	65	68
28	17	1,8	430	415	286	280	387	385	368	360	74	71
24	15	1,5	340	310	306	273	432	427	359	337	65	80
21	13	1,3	439	415	322	277	524	508	428	400	101	116

Approche isotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 4 (proche infrarouge) de l'image IKONOS en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche isotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	288	254	----	----	----	----	288	254	----	----
123	75	7,8	319	281	295	248	300	266	305	265	13	17
109	66	7,0	294	277	292	251	315	266	300	265	13	13
82	50	5,2	361	317	286	248	319	251	322	272	38	39
55	33	3,5	417	348	332	296	370	336	373	327	43	27
41	25	2,6	418	350	342	291	456	409	405	350	58	59
33	20	2,1	409	400	441	357	317	283	389	347	64	59
28	17	1,8	429	406	318	279	400	381	382	355	58	67
24	15	1,5	419	401	331	281	485	460	412	381	77	91
21	13	1,3	439	405	367	334	526	514	444	418	80	91

Approche anisotrope

Variation de l'erreur standard moyenne (ESM) et de l'erreur quadratique moyenne (RMS) de l'interpolation de Al_{M-3} par co-krigeage à partir de la bande 4 (proche infrarouge) de l'image IKONOS en fonction de la taille et de la densité d'échantillonnage (approche anisotrope).

Densité d'échantillonnage			Pige 1		Pige 2		Pige 3		Moyenne		Écart-type	
n	% de la grille	Densité n ha ⁻¹	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS	ESM	RMS
164	100	10,4	271	238	----	----	----	----	271	238	----	----
123	75	7,8	296	263	273	232	279	241	283	245	12	16
109	66	7,0	269	253	304	237	275	241	283	244	19	8
82	50	5,2	317	282	264	231	290	234	290	249	27	29
55	33	3,5	319	309	290	274	337	289	315	291	24	18
41	25	2,6	373	328	318	273	343	309	345	303	28	28
33	20	2,1	396	381	294	253	253	235	314	290	74	80
28	17	1,8	428	375	287	278	392	372	369	342	73	55
24	15	1,5	342	311	305	272	442	413	363	332	71	73
21	13	1,3	437	391	320	282	483	466	413	380	84	93