Université du Québec

INRS-Eau

INFLUENCE DE LA MICROTOPOGRAPHIE SUR LE RENDEMENT DES CULTURES ET LA QUALITÉ DES SOLS

Par

Isabelle Perron

Mémoire

présenté pour l'obtention

du grade de Maître ès science (M.Sc.)

Mai 2002

© droits réservés de Isabelle Perron 2002

REMERCIEMENTS

La personne à la base de ce projet est Dre Johanne Boisvert qui m'a ouvert la porte du Centre de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et qui m'a donné l'occasion de rencontrer des gens formidables. Plusieurs personnes ont collaboré à la réalisation de ce travail et je voudrais prendre quelques lignes pour les remercier.

Tout d'abord, je voudrais remercier mon directeur, Dr Daniel Cluis et mon codirecteur Dr Michel Nolin, du Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures (CRDSGC) d'AAC, de m'avoir fait confiance, de m'avoir accordé leur soutien ainsi que leur grande disponibilité. Tous deux ont également su m'apporter un excellent appui scientifique tout au long de ce projet.

Je voudrais signaler l'apport précieux de Mme Marie-Line Leclerc qui a su bien me conseiller en répondant à mes nombreuses interrogations et être un excellent support moral. Un merci particulier à Mme Marcelle Fortier, ma correctrice émérite, ainsi qu'à chacun des membres de l'équipe pédologique qui, par leur enthousiasme, leur dynamisme et leur humour m'ont permis de réaliser ce projet dans des conditions de travail agréables, je leur dis merci.

Et bien sûr, je ne peux passer sous silence les encouragements et la patience de mon conjoint. Merci Nick! Sans ta présence à mes côtés, l'exécution de ce projet aurait été plus ardue. Je dois aussi souligner l'appui de ma famille et de mes amis. Bien que vous soyez loin, j'ai toujours ressenti votre présence et votre appui essentiels à ma réussite.

RÉSUMÉ

On accorde de plus en plus d'importance à l'étude de la microtopographie en agriculture de précision car une bonne partie de la variabilité des rendements est attribuée à l'influence du microrelief sur le régime hydrique des sols, sur le transport des éléments nutritifs et des intrants et sur la dynamique des processus érosifs à l'intérieur des parcelles. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'utilité d'attributs primaires et secondaires, extraits du modèle numérique de terrain (MNT), dans un cadre d'agriculture de précision. Le modèle numérique d'élévation (MNÉ) a été élaboré à partir d'un levé topographique intensif (grille non alignée de 4 m x 11 m) d'un champ de 12 ha (120 m x 1000 m) de Marieville, comté de Rouville, réalisé en mai 2000 au moyen d'un système de positionnement par satellite bi-fréquentiel (unité fixe et unité mobile) de haute précision (± 5 cm d'altitude). Les attributs primaires ont été dérivés directement du MNÉ alors que les attributs secondaires ont été extraits des fonctions hydrologiques du préprocesseur prépro03. Une étude préliminaire montre de faibles relations entre les différentes propriétés du MNT, les indicateurs de la qualité des sols et le rendement, donc l'analyse statistique plus poussée a été limitée à la pente, l'indice d'hydratation superficielle et la tonalité de gris (photographie aérienne). D'autres données, telles que les propriétés physico-chimiques de la couche de surface (N = 147) la conductivité électrique en surface (N = 1945) et en profondeur (N= 1926) et les données de rendements (N = 5950 (maïs grain) et 5234 (soya)) ont été recueillies et géoréférencées sur la parcelle expérimentale.

La distribution des propriétés du sol et de la conductivité électrique était bi-modale. C'est la raison pour laquelle, le champ (population) à l'étude a été subdivisé en deux zones au moyen d'une analyse de classification automatique à k moyennes (k-means cluster analysis) appliquée sur les données de conductivité électrique centrées et réduites. Ces deux zones appartenaient à des classes texturales distinctes: argileuse et loameuse. Plusieurs indicateurs ont démontré une variabilité modérée à élevée: le contenu en sable (CV = 53 %), le contenu en argile (CV = 55 %), la teneur en MO (CV = 35 %), le P (CV = 47 %), le K (CV = 47 %), le Mg (CV = 82 %) et le Ca (CV = 42 %). L'analyse de variographie, suivie de l'interpolation par krigeage, ont permis de caractériser la structure de la variabilité spatiale et de localiser les zones à comportement homogène. Les analyses statistiques ont été conduites sur les valeurs mesurées ainsi que sur les valeurs prédites par interpolation.

Des analyses en composantes principales effectuées sur l'ensemble des données ainsi que pour chacune des zones, ont permis de grouper les descripteurs en facteurs facilement interprétables. Les groupements ont permis de démontrer des relations significatives avec le rendement des cultures. La pente, l'indice d'hydratation superficielle et la tonalité de gris ont permis de démontrer des relations significatives avec le rendement. Par contre, certaines propriétés (l'élévation, le contenu en sable et en argile, la teneur en K et en Mg) étaient modérément corrélées ($|R| \approx 0.44$ et 0.57) avec les rendements en maïs-grain et en soya. Les relations de la qualité des sols étaient plus élevées avec le maïs-grain en 1998 qu'avec le soya en 1999.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **III**

RÉSUMÉ ..... **V**

TABLE DES MATIÈRES ..... **VII**

LISTE DES TABLEAUX ..... **IX**

LISTE DES FIGURES ..... **XI**

1. INTRODUCTION **1**

2. REVUE DE LITTÉRATURE **5**

2.1 MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN (MNT) 7

2.1.1 Attributs topographiques du terrain 7

2.1.2 Segmentation d'une pente 8

2.1.3 Attributs primaires 9

2.1.4 Attributs secondaires 11

2.1.5 Fonction hydrologique du MNT 12

2.2 AGRICULTURE DE PRÉCISION 14

2.2.1 Le système de positionnement global (GPS) 14

2.2.2 Les capteurs de rendement 14

2.2.3 Les conductivimètres électriques et électromagnétiques du sol 15

2.2.4 La télédétection 16

2.2.5 La cartographie et l'échantillonnage intensif des sols 17

2.2.6 Les systèmes d'information géographique (SIG) 19

2.3 EFFETS DE LA TOPOGRAPHIE SUR LA QUALITÉ DES SOLS ET LE RENDEMENT DES CULTURES 21

2.3.1 Effets de la topographie sur la variabilité spatiale du sol 21

2.3.2 Effets de la topographie sur le régime hydrique des sols 22

2.3.3 Effets de la topographie sur le rendement et la qualité des cultures 23

2.3.4 Relations entre la CEA du sol, la qualité des sols, le rendement des cultures et la topographie 23

2.4 SYNTHÈSE 25

3. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE 27
3.1 DESCRIPTION DU TERRITOIRE 27
3.1.1 Le site à l'étude 27
3.2 ACQUISITION ET REPRÉSENTATION DES DONNÉES À RÉFÉRENCE SPATIALE 28
3.2.1 Données d'élévations 29
3.2.2 Données de sol 31
3.2.3 Données de rendement et d'humidité du grain 32
3.2.4 Données de CEA (VERIS 3100) 37
3.3 ANALYSES STATISTIQUES 38
3.3.1 Statistiques descriptives 38
3.3.2 Analyse de regroupement 39
3.3.3 Les boîtes à moustaches de Tukey 40
3.3.4 Analyse en composantes principales (ACP) 41
3.3.5 Corrélation et régression 41
3.3.6 Analyse de variographie 42
4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 43
4.1 ANALYSE DE LA STRUCTURE SPATIALE DES INFORMATIONS GÉOGRAPHIQUES RECUEILLIES 43
4.1.1 Analyse de la structure spatiale (variographie) 43
4.1.2 Caractérisation du milieu physico-chimique de la parcelle et stratification de la parcelle en zones d'aménagement 64
4.1.3 Caractérisation du milieu physico-chimique des zones d'aménagement 67
4.1.4 Variabilité spatiale de la topographie (modèle numérique de terrain) 70
4.1.5 Variabilité spatiale du rendement des cultures 72
4.2 ANALYSES DE RELATIONS ENTRE LES INFORMATIONS GÉOGRAPHIQUES RECUEILLIES 77
4.2.1 Analyse en composantes principales (ACP) 77
4.3 RELATION ENTRE LE RENDEMENT DES CULTURES, LES INDICATEURS DE QUALITÉ DU SOL ET LES DIFFÉRENTS ATTRIBUTS DU MNT 85
4.3.1 Corrélations de Spearman 85
4.3.2 Régressions linéaires multiples 92
5. CONCLUSION 98
6. BIBLIOGRAPHIE 101
ANNEXE 1: HISTOGRAMME FRÉQUENTIEL 107

LISTE DES TABLEAUX

Figure 2.1: Schéma de la procédure visant à modéliser les paramètres hydrologiques du bassin versant (BV). 12
Figure 2.2: Schéma illustrant le fonctionnement du conductivimètre à électrodes VERIS 3100 dans le sol (source: http://veristech.com) 16
Figure 3.1: Localisation du champ dans la municipalité de Marieville. 27
Figure 3.2: Dispositif d'échantillonnage du levé topométrique assisté par DGPS en mode bi-fréquentiel. 29
Figure 3.3: Représentation de la stratégie d'échantillonnage des indicateurs de la qualité des sols de la parcelle Viens. 31
Figure 3.4: Dispositif d'échantillonnage des mesures des données de rendement à l'aide du capteur de rendement (valeurs aberrantes éliminées et décalage corrigé). 36
Figure 3.5: Dispositif d'échantillonnage de la mesure de conductivité électromagnétique à l'aide du conductivimètre à électrodes VERIS 3100. 37
Figure 3.6: Paramètres descripteurs des boîtes à moustaches de Tukey. 40
Figure 3.7: Paramètres descripteurs du semi-variogramme théorique. 42
Figure 4.1: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes de la CEA a) en surface et b) en profondeur ainsi qu'une comparaison de la dispersion des valeurs de la CEA c) en surface et d) en profondeur, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 45
Figure 4.2: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes du contenu a) en argile, b) en limon, d) en sable et e) en matière organique de même qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: e) argile, f) limon, g) sable et h) matière organique à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 46
Figure 4.3: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes : a) du pH_{eau} et b) pH_{smp} ainsi que c) la CEC et d) le taux de saturation en bases de même qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: e) pH_{eau}, f) pH_{smp}, g) CEC et h) le taux de saturation en bases, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 47
Figure 4.4: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes de la teneur en a) P et en b) K ainsi que d) la capacité de fixation et e) le taux de saturation en P de même qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: e) P, f) K, g) Al et h) P/Al, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 48
Figure 4.5: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes des éléments secondaires a) Ca et b) Mg ainsi qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: d) Ca et e) Mg, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 49
Figure 4.6: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes des taux de saturation en a) Ca, b) Mg et c) K ainsi qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: d) Ca, e) Mg et f) K, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 50
Figure 4.7: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes des ratios a) Ca/Mg, b) Ca/K et c) Mg/K ainsi qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: d) Ca/Mg, e) Ca/K et f) Mg/K, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 51
Figure 4.8: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes de la teneur en a) épaisseur de l'horizon Ap ainsi que b) une

comparaison de la dispersion du descripteur, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 52
Figure 4.9: Représentation cartographique a) du MNÉ de la parcelle expérimentale ainsi que b) une comparaison de la dispersion du descripteur à partir de boîtes à moustaches de Tukey.....53
Figure 4.10: Représentation cartographique de la variabilité spatiale a) de la pente, b) de l'indice d'hydratation superficielle et c) de la tonalité de gris ainsi qu'une comparaison de la dispersion de chacun des descripteurs: d) la pente, e) l'indice d'hydratation superficielle et f) la tonalité de gris à partir de boîtes à moustaches de Tukey.....54
Figure 4.11: Représentation des paramètres hydrologiques du bassin versant (BV): a) inondation des zones de dépressions, b) définition de la direction de l'écoulement et c), simulation des réseaux hydriques superficielles du BV.....55
Figure 4.12: Carte de rendement à humidité contrôlée a) en maïs et b) en soya pour les saisons de croissance respectives de 1998 et 1999 ainsi qu'une comparaison de la dispersion de chacune des cultures: c) le maïs-grain et d) le soya, à partir de boîtes à moustaches de Tukey.....56
Figure 4.13: Semi-variogramme théorique a) du rendement en maïs-grain, b) de l'humidité du grain du maïs, c) du rendement en soya et d) de l'humidité du grain du soya.....57
Figure 4.14: Semi-variogramme théorique du contenu a) en argile, b) en limon, c) en sable et d) en matière organique.....58
Figure 4.15: Semi-variogramme théorique du a) pH_{eau}, b) pH_{smp} et de c) la teneur en aluminium.....59
Figure 4.16: Semi-variogramme théorique de la teneur a) en phosphore, b) en potassium c) en calcium et d) en magnésium.....60
Figure 4.17: Semi-variogramme théorique de a) la topographie et de la CEA b) en surface et c) en profondeur.....61
Figure 4.18: Histogramme fréquentiel de la densité de distribution de la population: a) de la CEA de surface, b) de la CEA en profondeur et c) du contenu en argile.....65
Figure 4.19: Histogramme fréquentiel de la densité de distribution de la population : groupement 1 : a) CEA de surface, b) CEA en profondeur, c) contenu en argile ; groupement 2 : d) CEA de surface, e) CEA en profondeur et f) contenu en argile.....66
Figure 4.20: Représentation cartographique de la stratification de la parcelle en deux zones d'aménagement au moyen de la méthode de groupement à k moyenne effectuée à partir des données de CEA.....66
Figure 4.21: Moyennes mensuelles des températures pour 1998 et 1999 comparativement à la normale.....76
Figure 4.22: Moyennes mensuelles des précipitations pour 1998 et 1999 comparativement à la normale.....76
Figure 4.23: Graphiques illustrant le choix des composantes interprétables extraite de l'ACP à partir de la règle de Kaiser-Guttman et du test de talus de Cattell.....77

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Schéma de la procédure visant à modéliser les paramètres hydrologiques du bassin versant (BV). 12
Figure 2.2: Schéma illustrant le fonctionnement du conductivimètre à électrodes VERIS 3100 dans le sol (source: http://veristech.com) 16
Figure 3.1: Localisation du champ dans la municipalité de Marieville. 27
Figure 3.2: Dispositif d'échantillonnage du levé topométrique assisté par DGPS en mode bi-fréquentiel. 29
Figure 3.3: Représentation de la stratégie d'échantillonnage des indicateurs de la qualité des sols de la parcelle Viens. 31
Figure 3.4: Dispositif d'échantillonnage des mesures des données de rendement à l'aide du capteur de rendement (valeurs aberrantes éliminées et décalage corrigé). 36
Figure 3.5: Dispositif d'échantillonnage de la mesure de conductivité électromagnétique à l'aide du conductivimètre à électrodes VERIS 3100. 37
Figure 3.6: Paramètres descripteurs des boîtes à moustaches de Tukey. 40
Figure 3.7: Paramètres descripteurs du semi-variogramme théorique. 42
Figure 4.1: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes de la CEA a) en surface et b) en profondeur ainsi qu'une comparaison de la dispersion des valeurs de la CEA c) en surface et d) en profondeur, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 45
Figure 4.2: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes du contenu a) en argile, b) en limon, d) en sable et e) en matière organique de même qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: e) argile, f) limon, g) sable et h) matière organique à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 46
Figure 4.3: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes : a) du pH_{eau} et b) pH_{smp} ainsi que c) la CEC et d) le taux de saturation en bases de même qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: e) pH_{eau}, f) pH_{smp}, g) CEC et h) le taux de saturation en bases, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 47
Figure 4.4: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes de la teneur en a) P et en b) K ainsi que d) la capacité de fixation et e) le taux de saturation en P de même qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: e) P, f) K, g) Al et h) P/Al, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 48
Figure 4.5: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes des éléments secondaires a) Ca et b) Mg ainsi qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: d) Ca et e) Mg, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 49
Figure 4.6: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes des taux de saturation en a) Ca, b) Mg et c) K ainsi qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: d) Ca, e) Mg et f) K, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 50
Figure 4.7: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes des ratios a) Ca/Mg, b) Ca/K et c) Mg/K ainsi qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: d) Ca/Mg, e) Ca/K et f) Mg/K, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 51

Figure 4.8: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes de la teneur en a) épaisseur de l'horizon Ap ainsi que b) une comparaison de la dispersion du descripteur, à partir de boîtes à moustaches de Tukey. 52
Figure 4.9: Représentation cartographique a) du MNÉ de la parcelle expérimentale ainsi que b) une comparaison de la dispersion du descripteur à partir de boîtes à moustaches de Tukey....53
Figure 4.10: Représentation cartographique de la variabilité spatiale a) de la pente, b) de l'indice d'hydratation superficielle et c) de la tonalité de gris ainsi qu'une comparaison de la dispersion de chacun des descripteurs: d) la pente, e) l'indice d'hydratation superficielle et f) la tonalité de gris à partir de boîtes à moustaches de Tukey....54
Figure 4.11: Représentation des paramètres hydrologiques du bassin versant (BV): a) inondation des zones de dépressions, b) définition de la direction de l'écoulement et c), simulation des réseaux hydriques superficielles du BV....55
Figure 4.12: Carte de rendement à humidité contrôlée a) en maïs et b) en soya pour les saisons de croissance respectives de 1998 et 1999 ainsi qu'une comparaison de la dispersion de chacune des cultures: c) le maïs-grain et d) le soya, à partir de boîtes à moustaches de Tukey....56
Figure 4.13: Semi-variogramme théorique a) du rendement en maïs-grain, b) de l'humidité du grain du maïs, c) du rendement en soya et d) de l'humidité du grain du soya. 57
Figure 4.14: Semi-variogramme théorique du contenu a) en argile, b) en limon, c) en sable et d) en matière organique....58
Figure 4.15: Semi-variogramme théorique du a) pH_{eau}, b) pH_{smp} et de c) la teneur en aluminium. 59
Figure 4.16: Semi-variogramme théorique de la teneur a) en phosphore, b) en potassium c) en calcium et d) en magnésium. 60
Figure 4.17: Semi-variogramme théorique de a) la topographie et de la CEA b) en surface et c) en profondeur. 61
Figure 4.18: Histogramme fréquentiel de la densité de distribution de la population: a) de la CEA de surface, b) de la CEA en profondeur et c) du contenu en argile....65
Figure 4.19: Histogramme fréquentiel de la densité de distribution de la population : groupement 1 : a) CEA de surface, b) CEA en profondeur, c) contenu en argile ; groupement 2 : d) CEA de surface, e) CEA en profondeur et f) contenu en argile. 66
Figure 4.20: Représentation cartographique de la stratification de la parcelle en deux zones d'aménagement au moyen de la méthode de groupement à k moyenne effectuée à partir des données de CEA....66
Figure 4.21: Moyennes mensuelles des températures pour 1998 et 1999 comparativement à la normale. 76
Figure 4.22: Moyennes mensuelles des précipitations pour 1998 et 1999 comparativement à la normale. 76
Figure 4.23: Graphiques illustrant le choix des composantes interprétables extraite de l'ACP à partir de la règle de Kaiser-Guttman et du test de talus de Cattell. 77
Figure A.1.1 : Histogramme fréquentiel de la densité de distribution de la population : a) épaisseur de l'horizon Ap, b) contenu en sable, c) fraction limoneuse moyenne, d) fraction limoneuse fine, e) contenu en argile, f) pH_{eau}, g) pH_{smp}, h) teneur en matière organique, i) teneur en phosphore, j) teneur en potassium, k) teneur en magnésium, l) teneur en calcium et m) teneur en aluminium. 107
Figure A.1.2 : Histogramme fréquentiel de la densité de distribution du groupe 1 : a) épaisseur de l'horizon Ap, b) contenu en sable, c) fraction limoneuse moyenne, d) fraction limoneuse fine, e) contenu en argile, f) pH_{eau}, g) pH_{smp}, h) teneur en matière organique, i)

1. INTRODUCTION

L'agriculture, la pédologie et l'hydrologie sont des sciences qui ont beaucoup évolué depuis les trente dernières années. L'arrivée du système de positionnement global par satellite (GPS) et l'amélioration de la qualité des systèmes d'information géographique (SIG) permettent aux scientifiques de modéliser la variabilité spatio-temporelle des écosystèmes. Ces technologies aident l'agriculteur à acquérir une gamme d'informations géoréférencées afin d'effectuer une gestion spécifique de leurs sols et d'aménager différemment les zones caractérisant les différents paysages observés dans un même champ. Cette nouvelle méthode de gestion, qu'on désigne sous le terme « agriculture de précision », cherche à améliorer l'état des ressources naturelles, au moyen d'une application plus efficace des intrants et d'un meilleur contrôle des différents facteurs de production végétale.

De même, depuis quelques années, les techniques géostatistiques ont été introduites comme outils de recherche dans le domaine agricole. Appartenant à la statistique spatiale, les méthodes de la géostatistique ont pour objectif d'identifier les propriétés et les structures à partir de l'information contenue dans un ensemble minimal de données géocodées par une modélisation de « l'espace ».

Les SIG contribuent à développer des modèles en vue d'améliorer la gestion des ressources eau-air-sol. Dans un cadre agricole, le régime hydrique des sols a été identifié comme une cause potentielle de la variabilité des sols et du rendement des cultures [Wright et *al.*, 1990]. La modélisation de l'écoulement hydrique, dans le secteur agricole, permet d'établir une relation spatiale entre l'eau, le rendement des cultures, les indicateurs de fertilité des sols et les descripteurs de terrain.

On accorde de plus en plus d'importance à l'étude de la microtopographie en agriculture de précision car une bonne partie de la variabilité des rendements est attribuée à l'influence du microrelief sur le régime hydrique des sols, sur le transport des éléments nutritifs et des intrants et sur la dynamique des processus érosifs à l'intérieur des parcelles.

L'hypothèse sous-jacente à cette étude est que la variation microtopographique a une influence directe sur la qualité des sols ainsi que sur le rendement et la qualité des cultures.

L'objectif général de cette étude est d'identifier des paramètres extraits du modèle numérique de terrain (MNT) de haute précision présentant un effet significatif sur le rendement des cultures (rotation maïs/soya) et sur quelques indicateurs de la qualité des sols (texture, fertilité, conductivité électrique *etc.*). Par ailleurs, cette étude permettra d'évaluer l'utilité d'un levé topographique intensif en agriculture de précision afin d'orienter les différentes recherches menées dans ce domaine.

Quelques objectifs spécifiques peuvent être énoncés:

1) Étudier et modéliser la variabilité spatiale de quelques attributs (primaires et secondaires) du MNT, d'indicateurs de la qualité des sols, de la CEA et du rendement en maïs-grain et en soya, à l'échelle de la parcelle.

2) Étudier l'efficacité d'une stratification de la parcelle en zones homogènes de gestion sur la variabilité spatiale, l'interprétation de la fertilité et de la productivité des sols.

3) Étudier et modéliser la relation existant entre certains attributs du MNT, certaines propriétés physico-chimiques du sol, la CEA du sol et le rendement des cultures d'une parcelle de la région de la Plaine de Montréal en rotation maïs/soya.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

L'avancement des technologies en informatique a contribué à l'évolution et à l'accessibilité de plusieurs sciences, dont la géomatique, l'agriculture, la pédologie, l'hydrologie et les statistiques. La géomatique est la science et la technologie de la collecte, de l'analyse, de l'interprétation, de la distribution et de l'utilisation de l'information géographique. Elle englobe une foule de disciplines qui concourent à créer une représentation détaillée mais compréhensible du monde physique et de l'espace nous entourant. Ces disciplines sont: les levés et la cartographie, la télédétection, les systèmes d'information géographique (SIG) et le système de positionnement global par satellite (GPS). À plusieurs égards, cette science a influencé l'orientation des recherches portant sur l'agriculture, la pédologie et l'hydrologie depuis une vingtaine d'années. De plus, des méthodes statistiques appartenant à la statistique spatiale (géostatique) ont favorisé le développement de concepts spatiaux fondamentaux, l'analyse des informations géoréférencées, de même que la modélisation de « l'espace » qui identifie les propriétés et les structures de l'information contenue dans l'ensemble des données.

L'ensemble de ces développements a facilité le travail de bien des chercheurs et a permis une plus grande disponibilité de l'information et une association entre les disciplines qui sont en interaction. La modélisation des données numériques de diverses disciplines permet l'étude des interrelations existantes entre les propriétés des écosystèmes terrestres. Ces simulations contribuent à déterminer la distribution spatiale de divers facteurs généralement à la base de processus significatifs [Gessler et *al.*, 2000].

Par exemple, depuis le début des années 80, une attention particulière est accordée à l'étude de la variabilité des rendements et des sols, à l'intérieur de champs agricoles et ce, en vue d'établir des stratégies de gestion plus appropriées [Clark et Lee, 1996]. Plusieurs facteurs et processus sont responsables de la distribution spatiale des sols et des rendements et rendent la gestion des pratiques agricoles plus complexe. Nombreux sont les chercheurs qui tentent de déterminer les facteurs prédominants, directs ou indirects, des différents patrons spatiaux observés. Pour identifier adéquatement la variabilité à l'intérieur de ses champs, l'agriculteur peut aujourd'hui compter sur de l'équipement spécialisé capable de saisir en temps réel, une quantité importante de données et de les mémoriser pour une analyse ultérieure [Forand, 2000].

L'étude de la microtopographie est une des nouvelles avenues de recherche en agriculture de précision. Cette variable expliquerait une bonne partie de la variabilité des rendements, principalement en raison de son influence du microrelief sur le régime hydrique des sols [Timlin et *al.*, 1999; Deguise et McNairn, 2000; Wang et *al.*, 1996], sur le transport des éléments nutritifs et des intrants et sur la dynamique des processus érosifs à l'intérieur des parcelles. Le microrelief caractérise les inégalités du relief de petite amplitude (de l'ordre du mètre). Plusieurs chercheurs [Kohler, 2001; Masson et Maidment, 2000], ont développé des outils et des algorithmes permettant l'analyse du comportement hydrique à partir des modèles numériques d'élévation.

Cette section présente une description des développements récents retrouvés dans la littérature concernant la réalisation de modèles numériques de terrain. Elle traite également de l'importance des données géoréférencées pour une meilleure représentation spatiale de la variabilité du rendement des cultures et de la qualité des sols selon une approche de gestion agricole localisée (agriculture de précision). Finalement, cette revue de littérature se termine par un abrégé résumant les effets de la microtopographie sur la variabilité des sols, le régime hydrique et le rendement des cultures.

2.1 Modèle numérique de terrain (MNT)

Le modèle numérique d'élévation (MNÉ) se définit comme une représentation tridimensionnelle (3D) du territoire. Il fait référence aux valeurs d'élévations, il peut s'agir de valeurs discrètes (points) ou de valeurs prédites par interpolation [Moore et *al.*, 1991]. Le MNÉ est un sous-ensemble du modèle numérique de terrain (MNT) qui, lui, est une représentation spatiale des attributs du terrain (pente, orientation, *etc.*) [Bell et *al.*, 1995; Moore et *al.*, 1991]. La variabilité spatiale de la topographie peut être représentée en 3D par un MNÉ obtenu à partir d'une matrice présentant les élévations [Bell et *al.*, 1995]. Lorsqu'on prévoit l'élaboration d'un MNÉ, il est important de déterminer son utilité, puisqu'il existe de nombreuses méthodes d'acquisition de données d'élévations, de même que plusieurs techniques d'interpolation et de représentation cartographique.

La topographie fait référence aux caractéristiques géomorphologiques de surface du relief [Aronoff, 1995]. D'un point de vue géomorphologique, le paysage (topographie) est une association de reliefs individuellement transformés au cours de son processus d'évolution [Ovalles et Collins, 1986]. Il est possible d'étudier la topographie d'une région selon différentes perspectives, c'est-à-dire selon diverses échelles cartographiques. La macrotopographie consiste à étudier la topographie d'une zone sur plusieurs centaines, voire quelques milliers de mètres; la mésotopographie représente des aires selon une échelle de 10 à 100 mètres, alors que la microtopographie se concentre principalement sur des surfaces de quelques mètres [Florinsky et *al.*, 2000].

2.1.1 Attributs topographiques du terrain

À partir du MNT, il est possible de dériver des paramètres pouvant être utiles à l'élaboration de stratégie de gestion d'agriculture de précision. Il existe deux catégories d'attributs: a) les attributs primaires et b) les attributs secondaires [Moore et *al.*, 1993b]. Lorsqu'on parle d'attributs topographiques de terrain on fait souvent référence à une terminologie appartenant à la géomorphologie. Une terminologie commune est employée dans la littérature pour définir l'ensemble des positions d'un versant de pente.

2.1.2 Segmentation d'une pente

Selon Gessler et *al.* (1996), un versant peut être défini comme un objet spatial permettant le maintien du réseau d'écoulement hydrique du sommet d'une pente vers sa base. La segmentation de la pente s'effectue généralement comme suit: le sommet (upper slope, summit, interfluve) caractérisé par la ligne de partage des eaux, l'épaulement (shoulder), le revers (backslope), le milieu de la pente (middle slope) et finalement, le bas de pente (footslope) marqué par le talweg.

Dans l'optique de développer un programme informatique, plusieurs chercheurs ont tenté d'établir une classification, dont l'objectif premier est de faciliter l'identification des différents segments de versant pour l'interprétation et la comparaison de l'ensemble des différentes représentations développées, à partir de la base de données brutes employée pour la conception du SIG. Par exemple, la combinaison de la carte des types de terrain et de la carte des sols d'un même champ pourrait avoir comme objectif d'identifier la position topographique (sommet, milieu de la pente, dépression) des séries de sols à l'intérieur de la parcelle en vue d'élaborer des plans d'échantillonnage précis et moins coûteux [Piekutowski., 2000]. Différentes typologies ont été développées, certaines simplistes, alors que d'autres sont plus complexes. En voici deux exemples:

1) Depraetere (1991) a établi qu'en théorie, 256 cas sont possibles (2^8). Afin de simplifier la classification, seulement dix-neuf classes topographiques ont été retenues pour les différencier. Elles peuvent finalement être regroupées selon cinq familles de formes: a) plans horizontaux (absence de relief), b) sites encaissés (dépressions, vallées), c) versants, d) sites dégagés (sommets, crêtes) et e) cols. À partir de cette classification, il est possible de distinguer et d'identifier les cols, les lignes de crêtes et de talwegs.

2) Piekutowski (2000) opte pour un modèle plus simple établi par MacMillan et *al.* (1999). À partir des MNÉ, les champs agricoles sont segmentés en différents éléments de terrain appartenant à l'une des quatre catégories suivantes: 1) plateau ou haut de pente; 2) pente convexe; 3) pente concave et 4) dépression [Piekutowski, 2000]. Il est à noter que ce modèle a été développé pour des paysages très accidentés, qualifiés de montagneux de l'Ouest canadien alors que la région étudiée par Piekutowski se caractérise par un microrelief inscrit dans un relief plat à légèrement ondulé.

2.1.3 Attributs primaires

Un attribut primaire est un élément calculé directement à partir des données d'élévations [Wilson et *al.*, 1995]. Une vingtaine d'attributs peuvent être dérivés du MNT. Chacune des cellules du MNT est évaluée et reclassifiée en fonction des attributs calculés à partir d'algorithme et d'une fenêtre de filtrage. La nouvelle valeur de la cellule est située au milieu de cette fenêtre et représente la moyenne pondérée des valeurs contenues dans la fenêtre. Deux méthodes différentes ont été développées afin de calculer les attributs primaires; la méthode de Horn (1981) efficace pour les surfaces à fort relief et l'algorithme de Zevenbergen et Thorne (1987) idéal pour les surfaces à faible relief. L'algorithme de Zevenbergen et Thorne présente plus d'intérêt puisque l'étude en cours traite du microrelief. Zevenbergen et Thorne (1987) ont développé une équation quadratique polynomiale comprenant 9 termes:

$$z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + C \qquad (1)$$

où z représente l'élévation et x et y sont les coordonnées géographiques de chacune des données. Cet algorithme est associé à une fenêtre d'une dimension de 3 cellules par 3 qui se déplace dans la matrice d'altitudes où chacun, des coefficients mesurés, sert à calculer certains des principaux attributs primaires (équations 2 - 3 - 4 - 5 et 6).

La pente, aussi appelée déclivité du terrain (β), représente le plan tangent de la cellule; elle peut être mesurée en degrés arc ou en pourcentage [Aronoff, 1995; Burrough, 1986].

$$\beta = arctan\left[\left(G^2 + H^2\right)^{1/2}\right] \qquad (2)$$

Suite à la caractérisation de la pente, il est possible de déterminer l'orientation du plan (φ). Ce paramètre permet d'identifier la direction de la pente la plus forte et est décrit selon l'angle formé lorsqu'on se déplace dans le sens horaire, par rapport au nord [Aronoff, 1995].

$$\varphi = 180 - arctan\left(\frac{H}{G}\right) + 90\left(\frac{G}{|G|}\right) \qquad (3)$$

Par la suite, la courbure (χ) nous permet d'estimer si la cellule à l'étude appartient à une zone concave ou à une zone convexe. Dans le premier cas, la valeur exprimée est positive alors que dans le second cas, elle est négative. Les formules sont présentées ci-dessous:

$$\omega = 2\frac{DH^2 + EH^2 - FGH}{G^2 + H^2} \tag{4}$$

$$\phi = -2\frac{DH^2 + EH^2 + FGH}{G^2 + H^2} \tag{5}$$

$$\chi = \omega - \phi \tag{6}$$

où le plan de courbure (ω) définit si la circulation de l'eau converge ou diverge à un point donné [Simmons et *al.*,1989]. Ce paramètre permet d'établir la structure du réseau hydrographique, alors que le profil de courbure (ϕ) caractérise la courbure dans le sens de la pente et décrit le taux de changement de la pente selon sa direction.

Les attributs retenus sont les plus utilisés dans le cadre de travaux d'analyse de la microtopographie locale dans des domaines s'appliquant à l'hydrologie et à l'agriculture de précision. L'inclinaison de la pente ainsi que son orientation ont un impact significatif sur les facteurs affectant la formation du sol et le développement du réseau hydrographique [Bourennane et *al.*, 1996, Khakural et *al.*,1996]. Par exemple, l'orientation détermine la direction de l'écoulement et peut servir à dresser un croquis des couloirs d'écoulement préférentiels et à modéliser les bassins versants (identification des tributaires et détermination de la ligne de partage des eaux). En ce qui a trait à la courbure, elle permet, d'une part, d'identifier les zones d'accumulations ou de pertes en eau et en sédiments lesquelles affectent directement les propriétés physico-chimiques du sol [Gessler et *al.*, 2000].

2.1.4 Attributs secondaires

Moore et *al.* (1993a) ont développé un modèle quantitatif représentant une intégration d'analyse du MNT et de modèles statistiques. Ces indices statistiques, attributs secondaires, ont permis à Gessler et *al.* (2000) de quantifier et de qualifier la variabilité spatiale du rendement ainsi que certains descripteurs pédologiques et hydrologiques.

L'indice d'hydratation superficielle (ϖ) est utilisé pour décrire la distribution des zones de saturation en eau, attribut influençant la variabilité spatiale des propriétés du sol (Moore et *al.*, 1993a).

$$\varpi_T = ln\left(\frac{A_s}{T\tan\beta}\right) \text{ ou } \varpi = ln\left(\frac{As}{tan(\beta)}\right) \quad (7)$$

où A_S représente l'accumulation des flux, T la transmissivité alors que β correspond à l'angle de la pente. L'indice d'hydratation superficielle(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 [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 vallée [Moore et *al.* 1993a; Wilson et *al.* 1995].

L'indice de la puissance de l'écoulement (Ω) est une mesure permettant de déterminer le pouvoir érosif de l'eau de ruissellement.

$$\Omega = A_s \tan\beta \quad (8)$$

Le calcul de l'indice de la capacité de transport du sédiment (τ) s'effectue à l'aide de l'algorithme suivant:

$$\tau = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^m \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^n \quad (9)$$

où m = 0,6 et n = 1,3.

2.1.5 Fonction hydrologique du MNT

En plus des attributs primaires et secondaires, il est possible de dériver, à partir du MNÉ, des paramètres hydrologiques permettant d'étudier le comportement hydrique du bassin versant (BV). En effet, l'amélioration de la performance de l'ordinateur, l'augmentation de la capacité d'emmagasinement de données, le développement de technologies permettant la capture de données à références spatiales et temporelles plus précises et moins coûteuses, ainsi que l'élaboration de SIG plus conviviaux, ont permis à plusieurs hydrologues et ingénieurs d'extraire, à partir du simple MNT, différentes données hydrologiques.

Certains chercheurs [Kohler, 2001; Masson et Maidment, 2000] ont contribué à l'élaboration d'une procédure visant à modéliser différentes étapes du cycle hydrologique observable sur un BV, et ce, afin de mieux comprendre le comportement hydrique, fonction du relief, en milieu naturel. L'extraction de données hydrologiques à partir du MNÉ s'effectue de façon hiérarchique (figure 2.1).

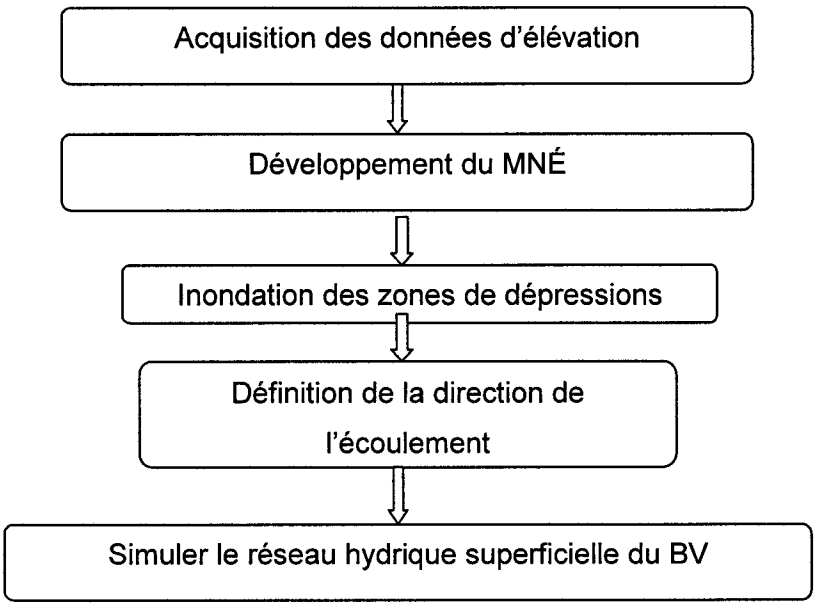


Figure 2.1: Schéma de la procédure visant à modéliser les paramètres hydrologiques du bassin versant (BV).

La première étape consiste en l'inondation des zones de dépression. Ceci permet d'éliminer les artéfacts créés par des altitudes de valeurs égales, puisque la résolution verticale du MNT n'est souvent pas suffisante. L'ensemble des trous (valeurs entourées d'altitudes supérieures), qu'ils soient réels ou artificiels doivent être inondés afin de préserver le bilan de masse du système. Il existe deux techniques pour remédier à ces artéfacts: l'inondation, technique la plus utilisée, et l'excavation. Inonder signifie attribuer la valeur d'altitude la plus basse de la cellule adjacente à la cellule de dépression, ce qui résulte du remplissage de la dépression et permet la continuité du bilan de masse et, par le fait même, l'écoulement du réseau hydrique.

À partir de la matrice d'inondation des dépressions, il est possible d'établir la direction de l'écoulement. L'algorithme de direction des flux permet d'identifier le patron de drainage de surface établi à l'intérieur du BV. Différentes méthodes peuvent être employées pour déterminer la direction de l'écoulement, cependant la majorité des algorithmes de détermination de la direction des flux utilisent le raisonnement des quatre ou des huit directions. La technique des 8-D est la plus simple et la plus utilisée dans le développement des différents logiciels de SIG. Un filtre se déplace sur la matrice d'inondation et attribue une valeur de 2^1 à 2^8 à chacune des cellules selon le sens horaire, supposant ainsi que l'eau s'écoulera en direction de la cellule voisine ayant l'altitude la moins élevée [Kohler, 2001].

L'établissement de la direction de l'écoulement permet ensuite de définir l'accumulation des flux. Ce paramètre fait référence à « l'eau accumulée » dans chacune des cellules du MNT et permet de simuler le réseau d'écoulement superficiel à l'intérieur du BV. Le patron d'écoulement est défini à partir du cumul des cellules qui drainent dans la cellule analysée. Cette simulation de l'écoulement assume que la surface est imperméable et que le mouvement de l'eau s'effectue uniquement en fonction des gradients d'élévations. Cette hypothèse n'est pas le reflet de la réalité, mais pourrait être plus réaliste en subdivisant le BV en zones homogènes et permettrait de déterminer l'accumulation ou le transport de l'eau du sol en fonction de la topographie [Bell et *al.*, 1995].

2.2 Agriculture de précision

L'agriculture de précision se définit comme étant une approche qui consiste à connaître et à comprendre la variabilité des sols et des rendements à l'intérieur d'un champ donné, d'en déterminer les causes et, dans la mesure du possible, de la contrôler par l'application modulée des intrants et la gestion localisée des ressources [Nolin et *al.*, 1997]. Le concept, à la base de l'agriculture de précision, consiste à subdiviser un champ hétérogène en petites unités homogènes, quant à leurs caractéristiques, potentialités et comportements, afin d'obtenir une gestion plus efficace des intrants [Larson et Robert, 1991]. Pour atteindre cet objectif, l'agriculture de précision fait appel à différents outils technologiques et informations géographiques.

2.2.1 Le système de positionnement global (GPS)

Le système de positionnement global (GPS) est capable de saisir en temps réel une série de données géoréférencées de la surface. Il est alors possible de connaître la position d'un point tant en latitude, en longitude qu'en altitude [Clark et Lee, 1996]. Cette technologie offre l'avantage de travailler à des échelles très grandes ($\geq$ 1: 10000) et de localiser des données à une précision de 1 m. Il est alors possible de réaliser des applications de gestion des sols dans un cadre d'agriculture de précision [Wilson et *al.*, 1995]. À titre d'exemple, le GPS peut être utilisé pour localiser les échantillons de sol, de rendement et de la conductivité électrique apparente (CEA). Ce système est facile d'utilisation, rapide et peu dispendieux [Moore et *al.*, 1993a].

La correction différentielle augmente la précision du système GPS [Corbley, 1997] en réduisant les erreurs introduites lors du traitement des données [Clark, 1996]. La précision est un facteur essentiel à une meilleure estimation des valeurs non mesurées lors de l'interpolation servant à l'élaboration des représentations cartographiques.

2.2.2 Les capteurs de rendement

Dans le secteur agricole, l'arrivée du système de positionnement par satellite en mode différentiel (DGPS), combiné à un capteur de rendement installé sur une moissonneuse-batteuse, permet la collecte de données géoréférencées telles que les données locales de

rendement à la base de la production des cartes de rendement [Blackmore et Marshall, 1996]. Ces cartes jouent un rôle clé en agriculture de précision puisqu'elles permettent, à partir de l'information récoltée, de quantifier et de visualiser la variabilité spatiale d'une culture [Haneklaus et *al.*, 2000] et d'adapter, suite à l'identification des facteurs limitatifs, les pratiques culturales recommandables pour une gestion spécifique de la culture [Timlin et *al.*, 1999].

2.2.3 Les conductivimètres électriques et électromagnétiques du sol

Le conductivimètre électrique à quadripôle (VERIS 3100) et le conductivimètre électromagnétique (EM38) sont des systèmes qui permettent de cartographier la CEA du sol à partir de laquelle il est possible, par interpolation spatiale et co-régionalisation, d'établir la variation précise de la teneur en argile des sols à l'intérieur d'une parcelle [Vallée, 2001]. Ces outils permettent de caractériser et ainsi de délimiter les zones de sols ayant un comportement homogène, objectif premier d'une gestion d'agriculture de précision [Nolin et *al.*, 2000; Sudduth et *al.*, 1999]. Les systèmes sont jumelés à un DGPS afin de géoréférencer les données recueillies pour ensuite générer des cartes de CEA de très grande précision, grâce à la forte densité du pas d'échantillonnage (environ 4 m).

Le système VERIS utilise des pulsions de basse fréquence et mesure la conductivité électrique d'une couche de sol selon le principe des électrodes équidistantes de Wenner, remplacées par des disques-électrodes (*« coulter électrodes »*) en contact avec le sol [Vigier et *al.*, 2000]. Le principe des électrodes en série de Wenner tel qu'appliqué au système VERIS est illustré à la figure 2.2. L'unité de mesure de la CEA est le milliSiemens par mètre (mS/m).

Le conductivimètre électromagnétique EM38 mesure la CEA en mode dipôle vertical ou horizontal. Il utilise une fréquence d'opération de 14,5 kHz avec un espacement entre les solénoïdes d'un mètre. Il a une profondeur de pénétration d'environ 0,75 et 1,5 m pour les modes horizontal et vertical respectivement. Tout comme pour le VERIS 3100, l'unité de mesure de la CEA, obtenue à partir du EM38, est le milliSiemens par mètre (mS/m).

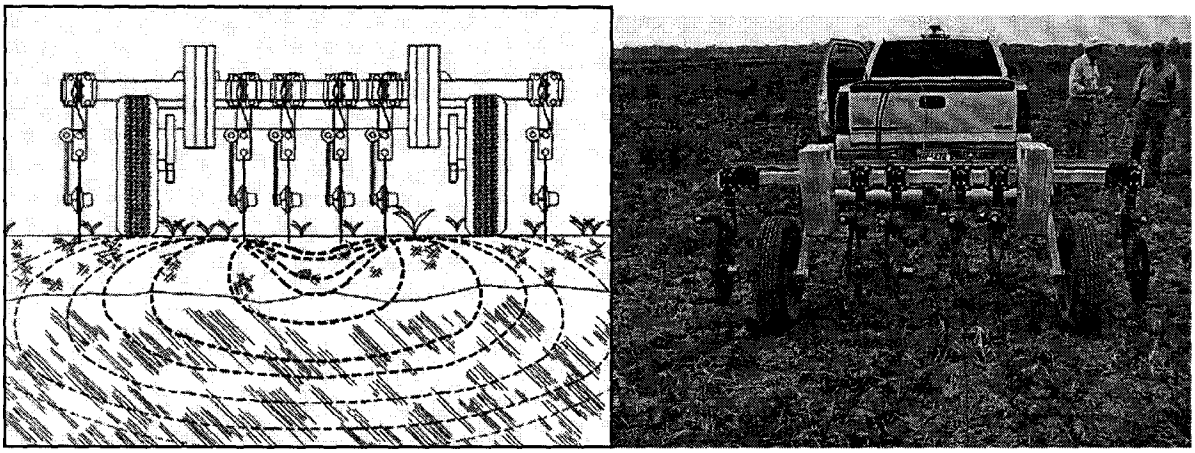


Figure 2.2: Schéma illustrant le fonctionnement du conductivimètre à électrodes VERIS 3100 dans le sol (source: http://veristech.com).

2.2.4 La télédétection

La télédétection en agriculture fait référence à un ensemble de connaissances et de techniques utilisées pour l'observation, l'analyse et l'interprétation des surfaces agricoles à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes satellites, aéroportées et embarquées [Viau, 2000]. Il existe deux sources de données en télédétection: la photographie aérienne, associée à la télédétection « conventionnelle » et l'image satellitale, associée à la télédétection numérique. En effet, il existe deux types de photographie aérienne conventionnelle, la photographie panchromatique et la photographie infrarouge couleur. Cette dernière est utilisée en agriculture depuis déjà quelques décennies, sous forme analogique et plus récemment sous forme numérique, pour la détection des dommages causés aux cultures par les insectes ou la sécheresse, la dégradation et la conservation des sols, l'estimation de la production des cultures, *etc.* [Bernier, 1997].

D'autres capteurs aéroportés sont aussi disponibles, la caméra vidéo, les caméras numériques, les capteurs opérant dans le thermique (8 à 14μm), dans les micro-ondes (Radar à synthèse d'ouverture), les capteurs hyperspectraux (MEIS) [Bonn et Rochon, 1993].

Aujourd'hui, les capteurs montés à bord des satellites offrent des résolutions spatiales intéressantes pour l'agriculture de précision. Mesurant la réflectance de la surface dans le visible et le proche infrarouge et même l'infrarouge moyen, nous retrouvons le capteur HRVIR

de SPOT-4 (10 m de résolution spatiale dans le panchromatique), les satellites américains IKONOS (1 m) et QUICKBIRD (70 cm).

Tableau 2.1 : Caractéristiques de satellites hautes résolutions pouvant supporter des applications d'agriculture de précision.

	HRVIR de SPOT-4	IKONOS	QUICKBIRD
Résolution spatiale :			
Panchromatique	10 m	1 m	70 cm
Multispectrale	20 m	4 m	2,8 m
Résolution spectrale			
Panchromatique :	0,61 µm – 0,68 µm	0,45 µm - 0,90 µm	0,45 µm - 0,90 µm
Bleu :	0,50 µm - 0,59 µm	0,45 µm - 0,52 µm	0,45 µm - 0,52 µm
Vert :	0,61 µm - 0,68 µm	0,52 µm - 0,60 µm	0,52 µm - 0,60 µm
Rouge :	0,78 µm - 0,89 µm	0,63 µm - 0,69 µm	0,63 µm - 0,69 µm
Proche IR :	1,58 µm – 1,75 µm	0,76 µm - 0,90 µm	0,76 µm - 0,90 µm
Résolution temporelle	3 à 26 jours	2,9 jours à 1 m ; 1,5 jours à 1,5m	1 à 3,5 jours
Largeur de faucher	60 km	13 km	16,5 km
Orbite	822 km	681 km	450 km

À partir de la réponse spectrale enregistrée par le capteur, rayonnement électromagnétique émis ou réfléchis par la surface terrestre, il est possible d'identifier la nature, la distribution, la couleur, la texture, la forme, la position géographique, *etc.* des éléments. Afin d'interpréter adéquatement les résultats obtenus, il est nécessaire de connaître le contexte et d'avoir une connaissance préalable du territoire. En agriculture de précision, la télédétection peut, entre autres, être utilisée pour évaluer la variabilité spatiale des sols, pour appliquer un modèle numérique de terrain, pour assurer le suivi des conditions hydriques des sols et pour procéder à l'estimation des rendements.

2.2.5 La cartographie et l'échantillonnage intensif des sols

Il existe plusieurs dispositifs d'échantillonnage des sols tels que l'échantillonnage complètement aléatoire, l'échantillonnage systématique à l'aide d'une grille de référence et l'échantillonnage stratifié. L'échantillonnage complètement aléatoire, bien qu'il s'agisse du dispositif d'échantillonnage le plus conforme aux règles qui gouvernent la théorie d'échantillonnage, n'est pas le plus efficace. Il présente le désavantage de sur-échantillonner certaines zones du champ et d'en négliger d'autres, ce qui diminue la qualité de l'interpolation.

L'échantillonnage systématique avec grille de référence permet, quant à lui, de remédier à cette problématique puisque la grille permet une distribution uniforme des points d'échantillonnage. Par contre, une grille rectangulaire peut omettre certaines variations périodiques. L'échantillonnage stratifié permet d'établir une densité d'échantillonnage proportionnelle à la variabilité des descripteurs à l'étude. Cette stratification doit cependant reposer sur des variables auxiliaires qui présentent une certaine relation spatiale ou causale avec la propriété étudiée. À titre d'exemple, les études pédologiques disponibles (surtout les plus détaillées) et les photographies aériennes, panchromatique ou infrarouge couleur, constituent un excellent point de départ pour l'étude de la variabilité des sols car elles permettent d'identifier les séries de sols susceptibles d'être rencontrées sur la ferme et prendre connaissance de leurs caractéristiques [Forand, 2000]. La carte des sols constitue alors un excellent outil pour planifier un échantillonnage intensif et ainsi réduire la variabilité spatiale des indicateurs de fertilité des sols [Nolin et *al.*, 2000].

La variabilité spatiale des indicateurs de fertilité des sols est principalement exprimée par la cartographie. Or, la précision et la fiabilité des cartes compilées dépendent de la représentativité des échantillons recueillis et des dispositifs d'échantillonnage [Vallée, 2001]. La stratégie d'échantillonnage la plus utilisée en agriculture de précision consiste à prélever un échantillon composite (huit sous-échantillons également répartis dans un rayon de 3 à 5 mètres du point géoréférencé) par hectare [Forand, 2000]. L'élaboration d'une bonne stratégie d'échantillonnage est importante puisqu'elle détermine le degré de précision des valeurs estimées. La précision obtenue croît généralement avec le nombre d'échantillons, cependant le coût d'obtention en temps et en argent croît également. Il faut donc établir un compromis entre la précision désirée à un coût minimum tout en tentant d'atteindre la meilleure précision possible.

La fiabilité de la prédiction ne repose pas seulement sur la densité, la qualité et la représentativité des échantillons prélevées, elle est aussi fonction de la qualité du modèle d'interpolation spatiale choisi pour reproduire la variation de la propriété de la parcelle. Avec l'utilisation des outils géostatistiques, les travaux de recherche ont caractérisé la structure d'organisation de la variation des propriétés du sol dans l'espace de façon plus détaillée [Vallée, 2001].

2.2.6 Les systèmes d'information géographique (SIG)

Un système d'information géographique (SIG) représente l'ensemble de la quincaillerie, des logiciels et des procédés utilisés pour la cueillette, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et la représentation de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes de gestion et de planification [Goodchild et *al.*, 1996].

Il existe deux méthodes pour structurer la base de données d'un SIG: le format vectoriel (représentation de point, de ligne et de polygone) et le format matriciel (cellule). L'approche matricielle semble toutefois la plus souvent utilisée lors de l'élaboration de MNT et pour la représentation cartographique de la variabilité spatiale des propriétés. L'unité de base est alors la cellule aussi appelée pixel [Aronoff, 1995; Burrough, 1986]. Toutefois cette approche présente quelques désavantages : l'uniformité de la taille des cellules [Aronoff, 1995; Burrough, 1986], la difficulté à représenter des changements abrupts, le manque de précision attribuable à la taille des cellules et la complexité pour reproduire un réseau hydrographique en zigzag. Néanmoins, cette méthode apparaît être la plus efficace. [Moore et *al.*, 1991].

Le choix de la résolution du modèle numérique est un paramètre très important pour la qualité de la représentation matricielle. La précision du modèle est tributaire de la taille des cellules puisqu'il s'agit de la plus petite unité homogène de la représentation d'une surface [Aronoff, 1995; Burrough, 1986]. Définir des cellules de petites tailles signifie générer une quantité importante de données, ce qui améliore la qualité de la représentation en se rapprochant davantage de la réalité. À l'inverse, une grande cellule conduit à une représentation où la qualité du détail est moins précise [Aronoff, 1995]. Dans le cadre de projets expérimentaux, Gessler et *al.* (2000) ont développé différents modèles numériques d'une même zone, selon des grilles dont les pixels étaient de 2, 4, 6, 8 et 10 m. Ces essais ont permis de déterminer qu'un MNT d'une résolution de 2 m, semble le plus adéquat puisqu'il présente de fortes relations statistiques avec les différentes caractéristiques du sol et une fine représentation de la variation topographique [Gessler et *al.*, 2000]. Néanmoins, une certaine portion de la variabilité ne peut pas être expliquée, ceci étant associé à la limite de la résolution. Par exemple, l'analyse d'une matrice présentant des cellules de 10 m x 10 m ne permet pas de définir les variations que l'on peut observer en deçà de cette résolution [Bell et *al.*, 1995].

La résolution a aussi une influence sur l'erreur de prédiction engendrée lors de l'estimation des valeurs d'élévations et de la dérive des attributs topographiques. Chaplot et *al.* (2000a) ont développé plusieurs modèles numériques d'élévation d'une même région, de résolutions différentes (10 à 50 m) et ont aussi comparé les erreurs de prédiction engendrées par trois méthodes de prédiction. Ils ont observé que l'erreur de prédiction augmente lorsqu'on diminue la résolution du MNÉ pour différents attributs de terrain. Également, il a été constaté que la technique de régression était fortement dépendante de la résolution du MNT. En effet, une résolution fine (10 à 30 m) engendre une erreur de prédiction faible alors qu'une résolution plus grossière génère une erreur de prédiction plus importante [Chaplot et *al.* 2000a].

Le choix de la technique d'interpolation est aussi un facteur à considérer puisque celle-ci permet d'estimer la valeur d'une propriété qui n'a pas été échantillonnée sur le terrain à l'intérieur d'une aire convertie à partir de points d'observations. L'observation la plus commune concernant le principe d'interpolation est, qu'en moyenne, il est plus probable que les points situés les plus près les uns des autres dans l'espace soient des valeurs similaires. La précision obtenue lors de l'application des différentes techniques d'interpolation est fortement dépendante de la densité d'échantillonnage, de la distribution des données et du choix de la méthode d'interpolation [Schut, 1976]. En effet, Wilson et *al.* (1995) ont mené une étude dont l'objectif était de déterminer si la quantité des points échantillonnés et le mode d'échantillonnage avaient une influence sur la qualité de la représentation. Ils sont arrivés aux conclusions suivantes: l'amplitude et le regroupement des erreurs de la distribution spatiale diminuent, lorsque la taille et l'écart de variation entre les données de l'échantillon augmente.

2.3 Effets de la topographie sur la qualité des sols et le rendement des cultures

Les efforts portés pour la gestion agricole spécifique ont permis de reconnaître que les différents facteurs, affectant le rendement des cultures et la qualité des sols, varient dans l'espace et dans le temps. La définition et la gestion de la variabilité du sol sont des facteurs prépondérants d'une bonne gestion en agriculture de précision. Les propriétés du sol ont un effet sur la croissance des cultures et sur le déplacement de l'eau dans le pédopaysage [Bell et *al.*, 1995]. L'étude de la relation spatiale entre la réponse d'une culture, la variabilité des nutriments dans le sol et les attributs du terrain, constitue une étape importante pour le développement de stratégies de gestion optimale des sols et des cultures en agriculture de précision [Braum et *al.*, 1999].

2.3.1 Effets de la topographie sur la variabilité spatiale du sol

Le sol se définit, selon le système de classification canadienne des sols [Comité d'experts sur la prospection pédologique d'Agriculture Canada (CEPPAC), 1987] comme suit: « *tout matériau minéral ou organique non consolidé, d'au moins 10 cm d'épaisseur, qui se trouve naturellement à la surface du globe et qui est capable de supporter la croissance des plantes* ».

Le climat, le matériel parental, la topographie, la végétation et le temps conditionnent le développement du sol [Gessler et *al.*, 1996; Khakural et *al.*, 1996, Moore et *al.*, 1993a] et favorisent la compréhension de la variation des descripteurs pédologiques [Vallée, 2001]. Le sol est un élément dont les constituants et les propriétés évoluent tant sur le plan vertical que sur le plan latéral. Cette variation peut être de source intrinsèque ou extrinsèque. Le premier cas fait référence à l'action des facteurs de formation du sol, alors que le deuxième correspond à la variabilité induite par l'activité agricole [Vallée, 2001].

Modéliser la distribution spatiale des sols, en plus de certaines caractéristiques physico-chimiques, est nécessaire à la compréhension du phénomène de variabilité spatiale des sols. Par exemple, au cours des dernières années, une relation étroite a été établie entre les propriétés du sol et la morphologie du paysage [Goddard et *al.*, 1996, Bourennane et *al.*, 1996]. En effet, des travaux de recherche ont permis d'établir une corrélation entre la

variabilité spatiale de plusieurs descripteurs physico-chimiques du sol (l'épaisseur du solum, l'épaisseur de l'horizon A, le contenu en matière organique et en argile, le pH, la capacité d'échange cationique, la masse volumique apparente, le profil d'humidité du sol, et les contenus en éléments nutritifs) et la topographie [Khakural et *al.*, 1996]. Cette modélisation aide à comprendre non seulement le patron de distribution spatiale du sol et de ses propriétés mais aussi à définir les conséquences directes et indirectes sur le rendement des cultures dans l'optique d'une gestion agricole plus précise.

2.3.2 Effets de la topographie sur le régime hydrique des sols

Le régime hydrique des sols a été identifié comme une cause potentielle de la variabilité des sols et du rendement des cultures. La modélisation de l'écoulement hydrique, dans le secteur agricole, permet d'établir une relation spatiale entre l'eau, le rendement des cultures, les indicateurs de fertilité des sols et les descripteurs de terrain, d'où son grand potentiel d'utilisation.

La topographie est considérée comme un des éléments qui conditionnent le régime hydrique des sols. Prenons comme exemple l'influence d'une pente sur l'écoulement hydrique d'un sol, selon sa géométrie [Brubaker et *al.*, 1994] et le positionnement d'une parcelle sur celle-ci [McConkey et *al.*, 1997]. Le patron de drainage sera différent, ce qui a des conséquences sur la disponibilité en éléments nutritifs du sol [Braum et *al.*, 1999] et sur la réponse des cultures [Stone et *al.*, 1985]. Des études menées par Wright et *al.* (1990) ont révélé que l'élément le plus fortement corrélé avec le rendement était la disponibilité en eau. À l'échelle parcellaire, le niveau d'humidité varie en fonction la microtopographie locale [Deguise et McNairn, 2000].

Bien que la majorité des études sur la microtopographie porte sur des parcelles expérimentales de petites tailles, il faut être conscient que les caractéristiques géomorphologiques des zones externes influencent directement le mouvement de l'eau à une échelle macroscopique. Les résultats d'une expérience conduite par Moore et *al.* (1993b), sur l'hydrologie des bassins versants extérieurs aux parcelles à l'étude, ont démontré un impact significatif sur les attributs du sol du bloc expérimental et, par conséquent, sur le potentiel de production.

2.3.3 Effets de la topographie sur le rendement et la qualité des cultures

La variation de rendement, variable expliquée, est mise en relation avec plusieurs variables explicatives. D'une part, l'hétérogénéité à l'intérieur d'une parcelle résulte parfois de l'érosion du sol, de la disponibilité en eau pour la plante, de la structure et de la texture [Brubaker et *al.*, 1993; Simmons et *al.*, 1989], ainsi que de la densité apparente et de l'épaisseur de surface du sol [Brubaker et *al.*, 1993]. D'autre part, les variations topographiques influencent directement les rendements des champs agricoles [Corbley, 1997]. En effet, des chercheurs de la Caroline du Nord [Stone et *al.*, 1985], ont établi que la position topographique (haut, milieu et bas de pente) était une variable explicative significative puisqu'elle influence directement le processus d'érosion et de sédimentation ainsi que les différences d'humidité du sol. La disponibilité en eau, qu'elle soit en surplus ou limitée, est probablement un important facteur expliquant la variabilité des rendements dans le paysage [Timlin et *al.*, 1999]. Le niveau d'humidité peut varier, entre autres, selon la microtopographie locale et la texture du sol [Deguise et McNairn, 2000].

La modélisation des données d'élévation et l'analyse des attributs du terrain permettent d'obtenir des informations complémentaires augmentant ainsi la qualité de l'interprétation de la carte de rendement [Goddard et *al.*, 1996]. Par exemple, on observe généralement dans les bas de pente de meilleurs rendements [Khakural et *al.*, 1996] puisqu'il s'agit, généralement, de zones de déposition, d'accumulation en matière organique et en nutriments provenant du haut de la pente et donc à une disponibilité additionnelle de l'eau pour la plante [Khakural et *al.*, 1996].

2.3.4 Relations entre la CEA du sol, la qualité des sols, le rendement des cultures et la topographie

Dans le but d'augmenter la qualité du MNT, certains auteurs explorent la possibilité d'utilisation de données auxiliaires ou de variables en support à l'interprétation ou à l'interpolation spatiale des données de rendements et de la qualité des sols. L'emploi de cartes de rendement, pour effectuer une planification agronomique à long terme, ne semble pas être toujours adéquate si c'est la seule variable utilisée puisque les données présentent

de nombreuses sources d'erreurs. Dans un cadre de planification d'agriculture de précision, la CEA peut être une variable auxiliaire à la variable de rendement puisqu'elle permet de valider les résultats extraits de la carte de rendement [Lund et *al.*, 1999]. Il est à noter que la relation entre le rendement et la CEA n'est pas toujours linéaire [Lund et *al.*, 1998].

La CEA se définit comme une mesure de la capacité d'un matériel à transmettre une charge électrique [Lund et *al.*, 1999]. Les mesures de CEA du sol sont utilisées depuis longtemps en géologie et en science de l'environnement afin de distinguer les propriétés du sol [Lund et *al.*, 1998], cette donnée étant le reflet des différents types de sols [Jacobs et Dunn, 1998]. Il existe, entre autres, une relation directe entre la texture du sol, la taille des grains, la masse volumique apparente, la porosité et la CEA. Par exemple, un sol sableux présente une faible CEA alors qu'un sol argileux se caractérise par une CEA relativement élevée [Jacobs et Dunn, 1998; Lund et *al.*, 1998; Lund et *al.*, 1999]. La CEA est, non seulement influencée par les propriétés physiques du sol, mais elle est aussi fonction de certaines propriétés chimiques de celui-ci, entre autres, le pH et la capacité d'échange cationique [Jacobs et Dunn, 1998].

De plus, la CEA est influencée par le contenu en eau du sol [Jacobs et Dunn, 1998; Fritz et *al.*, 1999; Vigier et *al.*, 2000], la salinité et le matériel parental [Fritz et *al.*, 1999]. Une augmentation de l'humidité du sol a pour effet d'augmenter les valeurs de la variable. À partir de certains travaux, il a été possible d'établir que la valeur de la CEA augmente avec une baisse de l'humidité (en raison de $\uparrow T^{o}$) et qu'elle semble aussi diminuer avec l'humidité (en raison de la $\downarrow$ de la salinité) [Lund et *al.*, 1999]. Certaines études ont permis d'observer une corrélation entre la variation du descripteur et la variabilité spatiale du rendement principalement lors d'années où la faible capacité de rétention en eau limitait la croissance de la culture [Sudduth et *al.*, 1996]. La mesure d'humidité du sol varie d'une pratique culturale à une autre, par exemple, si l'on compare une monoculture de maïs et une autre en rotation maïs-soya. Dans le premier cas, il semble que la relation entre la CEA et la réponse découlant de la monoculture soit bien établie alors que pour le second cas, cette relation n'est pas aussi évidente [Vigier et *al.*, 2000].

L'étude de Fritz et *al.* (1999), a permis d'observer que la CEA du sol était associée à la variation topographique. Les données de CEA obtenues étaient plus élevées (70 mS m^{-1}) dans les cuvettes et plus faibles dans les zones d'épaulement et de sommet (20 mS m^{1}). Ces différences sont probablement attribuables à la combinaison de l'accumulation du contenu en

eau et de la salinité dans les zones de dépression. La topographie est l'un des principaux facteurs permettant de déterminer le niveau et la distribution spatiale de la salinité des sols [Florinsky et *al.*, 2000].

Bien que plusieurs relations aient été établies entre les propriétés physico-chimiques du sol, le rendement et la topographie, il semble, pour d'autres études, que les résultats n'aient pas été concluants et que cette variable, ou d'autres variables géophysiques, n'améliore pas la qualité du MNT. En effet, Chaplot et *al.* (2000b) ont utilisé une donnée géophysique, soit la résistivité électrique apparente afin de déterminer si elle améliore la prédiction du MNT. Les résultats obtenus ont permis de constater que l'utilisation de cette variable supplémentaire, telle qu'une donnée géophysique, ne permet pas d'améliorer la qualité du modèle lorsque celui-ci est un modèle numérique de haute résolution (10 à 30 m) [Chaplot et *al.*, 2000b]. Tout comme pour la CEA [Vigier et *al.*, 2000, Lund et *al.*, 2000], une relation empirique a été établie entre la résistivité électrique apparente et les propriétés du sol telles la salinité, le contenu en eau, en argile et en matière organique [Chaplot et *al.*, 2000b].

2.4 Synthèse

Telle que vue dans ce chapitre, l'interprétation d'une carte de rendement détaillée, combinée à l'analyse d'un MNT à haute résolution et à un échantillonnage spécifique des sols, pourrait favoriser le développement d'un modèle d'agriculture intégré permettant d'effectuer une gestion agricole optimale [MacMillan et *al.*, 1999; Goddard et *al.*, 1996]. Caractériser et modéliser numériquement la topographie afin d'étudier les relations existantes avec les propriétés du sol est la clé pour comprendre le cycle biogéochimique des éléments nutritifs des écosystèmes terrestres car ils sont généralement à la base de processus significatifs qui contribuent à déterminer leur distribution spatiale [Gessler et *al.*, 2000].

3. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

3.1 Description du territoire

3.1.1 Le site à l'étude

La parcelle étudiée est localisée dans le sud-est de la plaine de Montréal, dans la municipalité de Marieville (figure 3.1) comté de Rouville. Elle est située dans la sous-région pédologique de la plaine étale de la vallée du Saint-Laurent [Lamontagne et Nolin, 1997], territoire présentant un faible relief (1 à 3 %). À une échelle locale, i.e. l'échelle du champ ou de la parcelle, la topographie peut parfois présenter des écarts plus importants. C'est particulièrement le cas de la parcelle étudiée, raison principale justifiant le choix de ce champ.

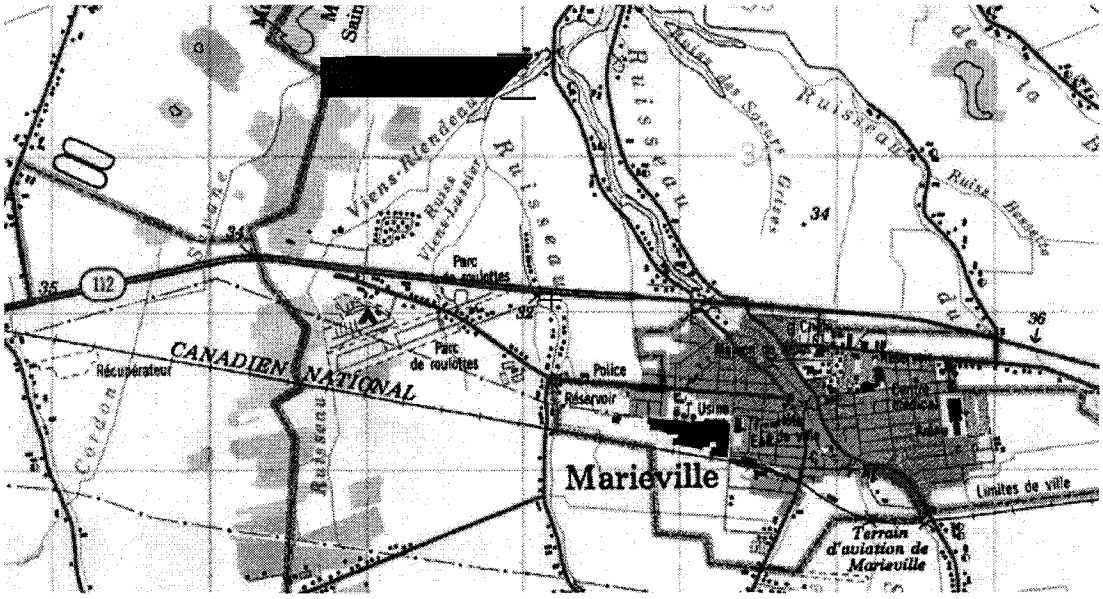


Figure 3.1: Localisation du champ dans la municipalité de Marieville.

L'étude se déroule sur une parcelle expérimentale de grande culture qui produit du maïs-grain en rotation avec du soya sur une superficie d'environ 12 hectares (120 m x 1000 m).

Les conditions climatiques de la région de Marieville sont qualifiées de continentales tempérées, c'est-à-dire que les températures sont ni trop chaudes en été, ni trop froides en hiver, tout en subissant des écarts prononcés. En fait, la température annuelle moyenne est de 6,1°C avec une température minimale moyenne de -15,3°C en hiver et maximale moyenne de 26°C en été. Les précipitations sont généralement abondantes, les moyennes annuelles sont d'environ 1000 mm [Grenon et *al.*, 1999].

3.2 Acquisition et représentation des données à référence spatiale

Les données de positionnement recueillies par le GPS sont générées en latitude (coordonnées x) et en longitude (coordonnées y). Les coordonnées X et Y sont ensuite transformées en projection cartographique Mercator transverse modifiée (MTM) selon le système de référence nord-américain de 1983 (nad83) à partir du logiciel GeoCalculator [Blue Marble, 1998].

Le logiciel ArcView [Environnemental Systems Research Institudes (ESRI), 1996a] a été utilisé pour la conception du SIG, pour la réalisation des cartes de base (MNÉ, carte de rendement, carte de CEA, *etc.*) ainsi que pour les représentations cartographiques des différentes applications hydrologiques. Toutes les cartes ont été générées en format matriciel, à l'aide du module Spatial Analyst [ESRI, 1996b]. La taille des pixels de la matrice a été établie à 5 m puisque le capteur de rendement recueille une donnée de rendement approximativement tous les 4,5 m. La matrice est ainsi composée de 190 colonnes et de 55 lignes. L'uniformité favorise la superposition des différentes cartes produites et facilite les traitements de même que les analyses statistiques. Le krigeage, technique d'interpolation appartenant aux géostatistiques, a été privilégié puisqu'il tient compte de la structure de l'organisation spatiale des données en utilisant le semi-variogramme comme outil de référence (section 3.3.6).

3.2.1 Données d'élévations

3.2.1.1 Acquisition de données

Un levé topographique intensif (grille non alignée de 4 m x 11 m) a été réalisé en mai 2000 au moyen d'un système de positionnement par satellite bi-fréquentiel (unité fixe et unité mobile) de haute précision (± 5 cm d'altitude), à l'aide d'un GPS en mode différentiel (DGPS). Ce mode de positionnement consiste à utiliser deux récepteurs simultanément et ainsi faire des corrections en temps réel. L'un des deux récepteurs est alors utilisé à titre de station de référence. Au total, 3351 points d'échantillonnage ont été recueillis, selon un dispositif d'échantillonnage d'est en ouest, c'est-à-dire sur le sens de la longueur du champ (figure 3.2).

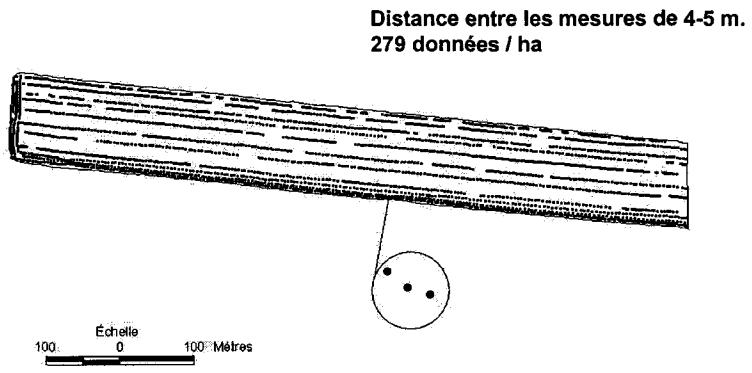


Figure 3.2: Dispositif d'échantillonnage du levé topométrique assisté par DGPS en mode bi-fréquentiel.

3.2.1.2 Correction des données d'élévations

Les données d'altitudes originales présentaient quelques valeurs ayant des coordonnées de latitudes et de longitudes similaires. Afin de pallier à cette redondance, la moyenne arithmétique des valeurs similaires a été effectuée. Ceci a réduit le total des points d'échantillonnage retenus pour les différentes analyses, à 2923.

3.2.1.3 Élaboration du modèle numérique d'élévation (MNÉ)

Le MNÉ a été développé à partir du SIG ArcView, version 3,2a [ESRI, 1996a] et du module Spatial Analyst [ESRI, 1996b].

Le préprocesseur CRWR-Prepro03 [Olivera et Maidment, 1999] a été utilisé afin de simuler le réseau hydrique, à l'intérieur de notre champ, à partir du MNÉ développé ultérieurement. Dans le détail, la fonction Prepro permet d'exécuter une série d'opérations telles que le remplissage des trous indésirables, la caractérisation de la direction du ruissellement, la définition de l'accumulation des flux et la simulation du réseau de drainage pour chacune des cellules de la matrice caractérisant notre champ.

Le module DEMAT-outil d'analyse de MNÉ [Behrens, 2000] a été utilisé pour dériver quelques attributs primaires tels que la pente, l'orientation, la courbure, le plan et le profil de courbure. L'attribut secondaire retenu, l'indice d'hydratation superficielle (ϖ) a été modélisé, à l'aide de la fonction « map calculator », selon la formule suivante (communication personnelle, K.L.Verdin et D.Maidment):

$$\varpi = ln\left(\frac{As + 1 * \text{taille du pixel}}{tan(\beta)}\right) \qquad (11)$$

où *As* représente l'accumulation des flux et β la pente exprimée en radian.

L'extension Image Analysis [ESRI, 1998] a été utilisée pour ajouter une variable auxiliaire au MNT. Image Analysis a permis la conversion de la photographie aérienne (1:15000) de la parcelle expérimentale, acquise le 5 juin 1997 (photo HMQ97-123-#44), en valeurs matricielles reclassifiées avec une échelle de mesure de tonalité variant de 0 à 255. Les différences de tonalités de la photo mesurent la qualité de la lumière réfléchie par les objets. Les tons de gris sont affectés par plusieurs facteurs dont la nature et le degré d'humidité d'un sol. Généralement, plus un sol est humide, plus il absorbe les rayons solaires et plus il apparaît foncé sur la photographie panchromatique. Comme le couvert végétal masque plus ou moins la réflectance du sol selon sa densité, il est essentiel d'acquérir les photographies au début ou à la fin de la saison végétative.

3.2.2 Données de sol

3.2.2.1 Acquisition de données de sol et indicateurs de fertilité

La couche de surface (0 - 20 cm) des sols a été échantillonnée selon un dispositif systématique par degré (4,5 m, 36 m, 50 m et 100 m) pour un total de 147 points (figure 3.3). Chaque échantillon provient d'un échantillon composite constitué de 4 sous-échantillons prélevés à l'intérieur d'un rayon de 1,5 m du point d'ancrage à l'aide d'une tarière hollandaise de 5 cm de diamètre.

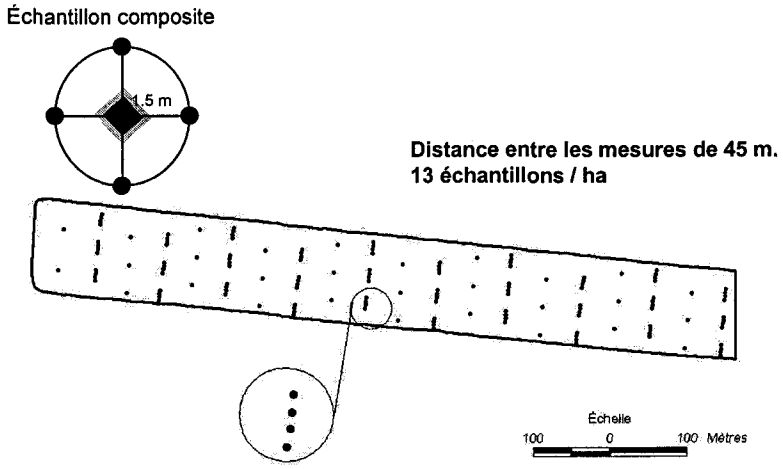


Figure 3.3: Représentation de la stratégie d'échantillonnage des indicateurs de la qualité des sols de la parcelle Viens.

Les contenus en sable, en limon et en argile ont été déterminés selon la méthode à l'hydromètre suivie d'un tamisage mécanique pour les fractions sableuses [Sheldrick et Wang, 1993]. La teneur en matière organique a été dosée selon la méthode de Walkey-Black [Tiessen et Moir, 1993]. La réaction du sol (pH_{eau}) a été mesurée dans l'eau [Hendershot et *al.*, 1993] et le pH tampon (pH_{smp}), selon la méthode de Shoemaker, McLean et Pratt [Tran et van Lierop, 1993]. Les éléments disponibles (P, K, Mg, Ca et Al) ont été extraits selon la méthode Mehlich-III [Tran et Simard, 1993].

3.2.3 Données de rendement et d'humidité du grain

3.2.3.1 Acquisition des données de rendement et d'humidité du grain

L'acquisition des données de rendement et d'humidité du grain a été effectuée à l'aide de capteurs d'humidité et de poids du grain installés sur une batteuse et jumelés à un DGPS. La récolte du maïs-grain en 1998 a ainsi permis l'enregistrement de 5950 données ponctuelles de rendement et d'humidité du grain. En 1999, 5234 données ont été enregistrées avec cette technologie lors de la récolte du soya. Comme il s'agit d'une prise de données dynamique, les valeurs mesurées sont très variables et présentent un nombre considérable d'erreurs systématiques [Blackmore et Moore, 1999], d'où l'importance d'éliminer les valeurs erronées et d'effectuer différents lissages en fonction de l'information que l'on veut tirer de la carte [Blackmore et Marshall, 1996].

Des études menées par Colvin et Arslan (2000) ont permis de conclure qu'il est possible d'obtenir des données de rendement suffisamment précises, dans un cadre d'agriculture de précision, lorsque le capteur de rendement est opéré adéquatement et étalonné régulièrement. Il semble toutefois difficile de déterminer la précision exacte du capteur de rendement sur de petites parcelles, puisque les départs et les arrêts de la moissonneuse introduisent des erreurs de mesure [Colvin et Arslan, 2000]. En effet, les cartes de rendement produites à partir des données brutes représentent les variations spatiales du rendement à l'intérieur du champ associées à diverses sources d'erreurs systématiques [Blackmore et Moore, 1999].

3.2.3.2 Correction des données erronées et aberrantes

Afin de standardiser les mesures de rendement en fonction de l'humidité des grains, un facteur de correction doit être appliqué. Ce facteur permet de mesurer un rendement pour un taux d'humidité uniforme de 15,5 % pour le maïs et de 15 % pour le soya. L'équation du facteur de correction applicable est la suivante:

$$\text{Facteur de correction} = \frac{100\% - \text{humidité actuelle}}{100\% - \text{humidité désirée}} \qquad (12)$$

Comparativement aux autres informations recueillies, les données brutes de rendement et d'humidité du grain sont généralement acquises à une très grande densité [Haneklaus et *al.*, 2000]. Dans notre cas le pas d'échantillonnage moyen était d'environ tous les 5 m. Conséquemment, le retrait de quelques données aberrantes n'affecte pas beaucoup la précision de la carte de rendement [Blackmore et Moore, 1999]. Le « nettoyage » des données brutes comporte l'élimination des données détectées par le système d'acquisition comme étant nulles ainsi que des valeurs situées à l'extérieur du pourtour du champ. De plus, afin d'éliminer les erreurs liées aux opérations de la batteuse (variation de la largeur de coupe, changement de vitesse, délai de capture, *etc.*), une procédure statistique de rejet de données douteuses a été utilisée. Cette procédure consiste à éliminer les points de rendement ayant des valeurs inférieures ou supérieures à la moyenne du rendement à humidité uniforme à plus ou moins deux écarts types. Cette stratégie permet d'éliminer facilement la plupart des valeurs extrêmes [Piekutowski, 2000]. Le retrait des valeurs nulles et erronées a entraîné la réduction du nombre des données de rendement et d'humidité du grain d'approximativement 25 % pour le maïs et de 35 % pour le soya.

3.2.3.3 Correction des erreurs de positionnement

Les données de rendement et d'humidité du grain ne sont pas conformes aux données de positionnement du DGPS, à cause d'un décalage existant entre la localisation spatiale de la zone récoltée et la géoréférenciation au moment de la mesure des engrangées dans la machinerie [Haneklaus et *al.*, 2000; Piekutowski, 2000]. Il est important de corriger cette erreur de position. Pour ce, il faut déterminer le délai entre l'enregistrement du positionnement et

celui de la capture de rendement. Lors d'une première analyse visuelle, un décalage moyen de 25 m, pour le maïs, et de 20 m, pour le soya, des données de positionnement (coordonnées X et Y), était observable aux extrémités du champ. Suite à cette observation, différents décalages (5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 et 50 m) ont été simulés à l'aide du chiffrier Excel en vue de repositionner systématiquement les données selon les différents décalages [Michaud et *al.*, 2000].

Les équations utilisées pour l'ajustement de l'erreur de positionnement sont:

a) lorsque l'avancement de la batteuse s'effectue selon la direction est-ouest

$$X_{recherché} = X_{origine} - (\text{longueur du décalage}) \cos\theta \quad (13)$$

$$Y_{recherché} = Y_{origine} - (\text{longueur du décalage}) \sin\theta \quad (14)$$

b) lorsque l'avancement de la batteuse s'effectue selon la trajectoire ouest-est

$$X_{recherché} = X_{origine} + (\text{longueur du décalage}) \cos\theta \quad (15)$$

$$Y_{recherché} = Y_{origine} + (\text{longueur du décalage}) \sin\theta \quad (16)$$

où X et Y représentent les coordonnées géographiques exprimées dans la projection MTM nad83, θ symbolise l'angle en radian du champ, lequel a été établi à $175° = \theta \times \pi / 180°$

Suite à ces corrections, des semi-variogrammes ont été élaborés à l'aide du logiciel statistique GS+ pour les différents décalages étudiés [Robertson, 2000]. Cette procédure a permis d'estimer le décalage moyen. Le semi-variogramme est un outil géostatistique qui permet d'évaluer la structure spatiale d'une série de données. L'analyse a été effectuée à partir de deux paramètres différents, soit l'effet de pépite (C_o) indice qui est une estimation de l'erreur de mesure et du R^2 de la fonction de validation croisée utilisée pour valider la qualité de la prédiction du semi-variogramme (section 3.3.6). L'objectif est de déterminer le décalage qui permet de minimiser le paramètre C_o et de maximiser le paramètre R^2 de la validation croisée. Les résultats de ces paramètres sont présentés au tableau 3.1 pour le rendement en maïs-grain et 3.2 pour le rendement en soya. Les résultats obtenus tendent à confirmer le décalage de 25 m observé dans le cas du maïs, et de 20 m, pour le soya. Une correction systématique du positionnement selon ces décalages a donc été retenue.

Tableau 3.1: Résultats des différentes analyses géostatistiques pour le maïs.

Décalage	Effet de pépite (C_o)	Fonction validation croisée (R^2)
Aucun	0,2500	0,53
5 mètres	0,2020	0,54
10 mètres	0,2160	0,54
15 mètres	0,2710	0,54
20 mètres	0,2300	0,56
25 mètres	**0,1800**	**0,58**
30 mètres	0,1860	0,58
40 mètres	0,1630	0,58
50 mètres	0,1480	0,57
60 mètres	0,1360	0,57
100 mètres	0,1980	0,56

Tableau 3.2: Résultats des différentes analyses géostatistiques pour le soya.

Décalage	Effet de pépite (C_o)	Fonction validation croisée (R^2)
Aucun	0,2259	0,47
5 mètres	0,2290	0,48
10 mètres	0,2243	0,49
15 mètres	0,2097	0,50
20 mètres	**0,2050**	**0,51**
25 mètres	0,2077	0,51
30 mètres	0,2231	0,49
40 mètres	0,2580	0,44

L'analyse et le lissage des données de rendement réduisent les sources d'erreurs et améliorent la qualité des cartes de rendement [Colvin et Arslan, 2000]. Le dispositif d'échantillonnage des mesures des données de rendement, à l'aide du capteur de rendement, est présenté à la figure 3.4. Il faut noter que, sur cette figure, les valeurs aberrantes ont été éliminées et que le décalage de positionnement a été corrigé. Des cartes de rendement et d'humidité ont alors été produites à partir des données corrigées, elles seront présentées au prochain chapitre.

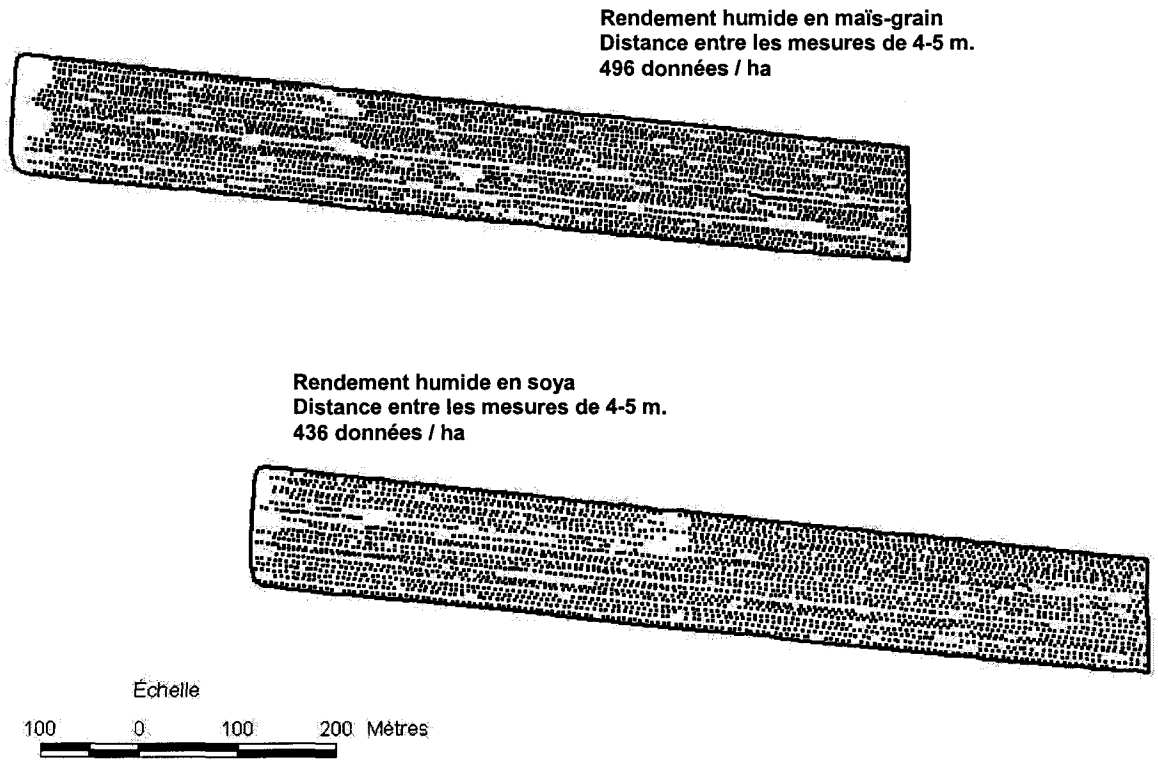


Figure 3.4: Dispositif d'échantillonnage des mesures des données de rendement à l'aide du capteur de rendement (valeurs aberrantes éliminées et décalage corrigé).

3.2.4 Données de CEA (VERIS 3100)

Les données de CEA ont été acquises à l'aide du conductivimètre électrique à quadripôle (VERIS 3100), selon un dispositif d'échantillonnage systématique (figure 3.5). Pour chacune des unités d'échantillonnage recueillies une valeur de CEA en surface et en profondeur était mesurée, soit à 30 cm et à 100 cm.

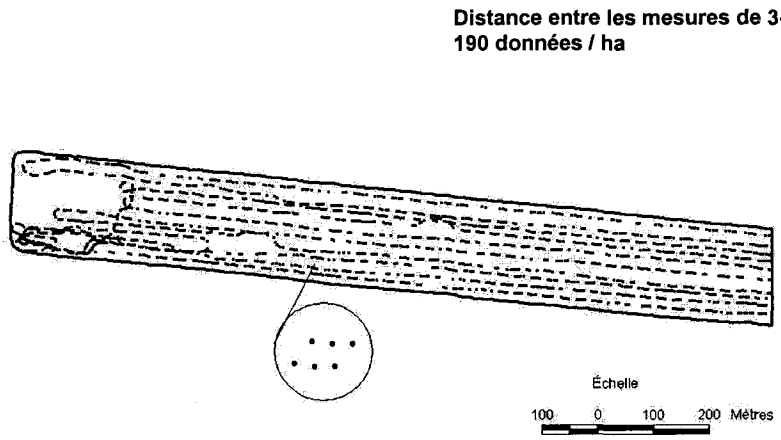


Figure 3.5: Dispositif d'échantillonnage de la mesure de conductivité électromagnétique à l'aide du conductivimètre à électrodes VERIS 3100.

3.3 Analyses statistiques

Les statistiques descriptives, univariées et multivariées ont été réalisées à partir du logiciel SYSTAT™, version 7.0 [SYSTAT, 1992]. L'ensemble des analyses géostatistiques a été effectué à partir du logiciel GS⁺, version 5 [Robertson, 2000].

Les paramètres statistiques ont été calculés à partir de la matrice des points d'échantillonnage des sols, la densité étant moindre que celle utilisée pour l'acquisition des données de rendement, du MNT et de la CEA et constituant l'échelle de travail la moins précise. À l'aide du logiciel ArcView, il a été possible d'estimer par interpolation spatiale et d'extraire la valeur de chacune des variables de rendement, d'attributs du MNT et de CEA, située au pixel correspondant au point d'échantillonnage de sol. Les données ont aussi été traitées sous forme de matrice continue (pixel de 5 m x 5 m), c'est-à-dire que l'ensemble des valeurs interpolées ont été utilisées pour les différentes analyses statistiques.

3.3.1 Statistiques descriptives

En statistique classique, il est possible de décrire la variabilité spatiale intraparcellaire à partir de descripteurs tels que le minimum, maximum, médiane, moyenne, écart-type et coefficient de variation (CV), puis d'évaluer la normalité de la distribution à partir des indicateurs d'asymétrie et de la kurtose.

Le CV est souvent utilisé pour comparer l'intensité de la variation intraparcellaire des indicateurs de la qualité des sols. S'inspirant de la classification de Wilding (1985), Nolin et Caillier (1992) ont proposé la classification suivante pour décrire la variabilité des sols:

Classe	CV (%)
Faible	< 15%
Modérée	15-35%
Élevée	35-50%
Très élevée	50-100%
Extrêmement élevée	≥ 100%

Le coefficient d'asymétrie et la kurtose sont deux indices centrés à zéro, permettant d'accepter ou de rejeter l'hypothèse de normalité des données. Le coefficient d'asymétrie permet de déterminer les déviations de la symétrie de la distribution étudiée, tandis que la kurtose fait référence à la similarité existante entre la courbe en forme de cloche de la loi normale et la courbe de la distribution étudiée. L'erreur standard de chacun des indices permet de déterminer si la valeur des indicateurs est extrême. Une valeur est considérée comme extrême, si l'intervalle produit par plus ou moins deux fois l'erreur associée à ces paramètres, n'inclut pas zéro [SYSTAT, 1992]. Les résultats des indices, coefficient d'asymétrie et kurtose, obtenus indiquent un non respect de la normalité de la distribution.

L'examen des statistiques descriptives ainsi que l'analyse visuelle des distributions de fréquences, de chacune des variables, ont montré que la majorité des descripteurs présentaient une distribution bi-modale; cela ne répond pas parfaitement au critère de la loi normale, basée sur une distribution de probabilités unimodale. Aucune transformation mathématique n'a permis de normaliser la distribution des données. Ainsi, il est à prévoir un comportement spécifique pour chacune des deux sous-populations présentes. Il convient donc de les identifier, de vérifier la connexité spatiale et de les délimiter à l'intérieur du champ.

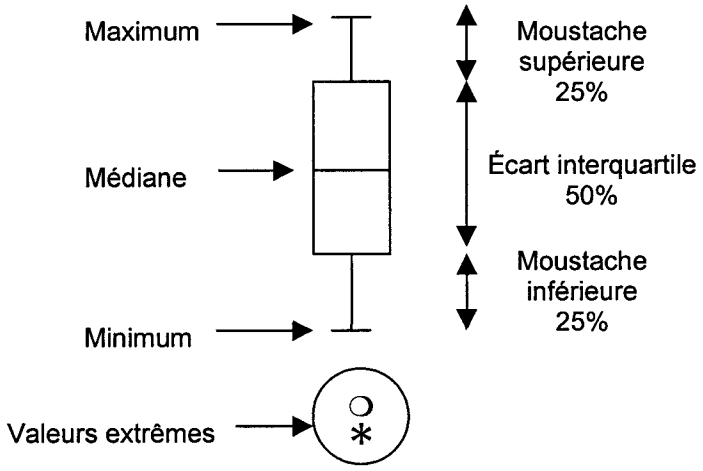
3.3.2 Analyse de regroupement

L'algorithme à K moyenne dont le principe de classification est non-supervisé [Fridgen et *al.*, 2000] est l'analyse de regroupement sélectionné pour résoudre la problématique de bi-modalité. Cette fonction effectue une division non-hiérarchique des données. Cette méthode a été privilégiée aux méthodes hiérarchiques agglomératives permettant de construire un dendogramme puisque le nombre de données traitées est très volumineux (> 100), ce qui encombre l'application et la rend pratiquement irréalisable [Young et Hammer, 2000]. L'analyse de classification automatique consiste à subdiviser l'échantillon de départ en fonction du nombre de sous-échantillons demandé par l'utilisateur [Legendre et Legendre, 1998]. La subdivision s'effectue en fonction de la distance euclidienne et a pour objectif de maximiser la variance existante entre les sous-populations créées tout en minimisant les variances intra-groupes [SYSTAT, 1992]. Les principes de reclassification de l'algorithme sont les suivants: 1) déterminer K éléments initiaux « centroïde » des K groupes, 2) placer les objets dans le groupe de centroïde le plus rapproché, 3) recalculer le centroïde de chaque

groupe, 4) répéter les étapes 2 et 3 (itérations) jusqu'à ce que les objets ne changent plus de groupe.

3.3.3 Les boîtes à moustaches de Tukey

La description des groupes formés suite à l'analyse de groupement sera réalisée à partir des boîtes à moustaches de Tukey (« Box-Cox plots ») (figure 3.6). Ces graphiques permettent de représenter schématiquement la distribution d'un échantillon [Le Guen, 2001]. La représentation graphique est caractérisée par la valeur minimale et maximale (les deux extrémités des moustaches) et trois quartiles (la boîte). La distribution est subdivisée en 4 zones de mêmes effectifs (25 %). Chacune des moustaches représente 25 % de l'échantillon alors que l'écart interquartile (boîte) correspond à 50 %. L'écart interquartile est utilisé comme indicateur de dispersion. Le deuxième quartile, illustrant la médiane, subdivise la boîte en deux. Les valeurs extrêmes sont individualisées et représentées par des ○ et des ∗. Ces valeurs dépassent 1,5 fois l'écart interquartile.



Adapté: Le Guen, 2001

Figure 3.6: Paramètres descripteurs des boîtes à moustaches de Tukey.

3.3.4 Analyse en composantes principales (ACP)

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée afin d'étudier la covariance existante entre les différents descripteurs métriques. Conséquemment, ceci réduit le nombre d'indicateurs initiaux en créant des regroupements, sous forme de composantes, entre les éléments corrélés entre eux, et donc élimine la multi-collinéarité qui pourrait empêcher une bonne estimation des paramètres du modèle établi lors des analyses ultérieures de régression multiple [Legendre et Legendre, 1998].

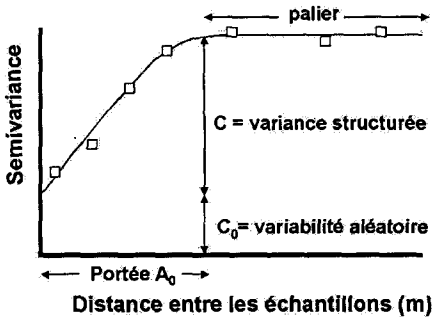
3.3.5 Corrélation et régression

La corrélation non-paramétrique de Spearman permet de quantifier l'interdépendance existante entre les différents paramètres étudiés. La corrélation de Spearman a été sélectionnée puisqu'elle est basée sur les rangs de classement et est moins exigeante quant aux hypothèses de distribution des variables. La distribution des différentes variables ne doit pas nécessairement répondre aux critères de normalité. De plus, le coefficient de corrélation non-paramétrique mesure la force de la relation entre deux variables, que cette relation soit linéaire ou non [Legendre et Legendre, 1998]. Les résultats obtenus permettront de répondre à un des objectifs de ce projet qui consiste à déterminer l'utilité des attributs primaires et secondaires du MNT et des indicateurs de fertilité du sol permettant ainsi la compréhension de la variabilité des rendements à l'intérieur d'un champ agricole.

La régression linéaire multiple permet d'exprimer la relation existante entre les facteurs explicatifs de la variabilité du rendement à l'intérieur de la parcelle.

3.3.6 Analyse de variographie

Le semi-variogramme, notamment appelé variogramme, est un outil géostatistique qui permet d'identifier si la série de données est aléatoire ou présente une structure spatiale [Robertson, 2000]. En fait, le semi-variogramme est une représentation graphique (figure 3.7) de la semivariance γ (h) en fonction de la distance entre les échantillons (h). La valeur de h où la semivariance (γ (h)) atteint le pallier est la portée (A_o). La portée représente la zone où il y a dépendance entre les échantillons. Ce paramètre constitue un indice très utile pour établir l'intervalle optimal d'échantillonnage. La valeur de γ (h) où h = 0 (C représente la composante aléatoire de la variabilité. Si la valeur de l'effet de pépite (C_o) observable sur notre semi-variogramme est nulle, cela signifie que le processus est régulier et que les mesures ne sont pas entachées par une variabilité instrumentale [Nolin et *al.*, 2000].



Adapté: Wilding et Drees, 1983

Figure 3.7: Paramètres descripteurs du semi-variogramme théorique.

Quatre différents types de modèles de variogramme sont souvent utilisés pour illustrer la variabilité spatiale d'une série de données agropédologiques. Il s'agit des modèles sphériques, linéaires, exponentiels et gaussiens. Suite à l'établissement du semi-variogramme théorique, il est possible d'effectuer une fonction de validation croisée qui permet d'évaluer la fiabilité du modèle obtenu. En effet, plus le coefficient de validation croisée (R^2vc) est élevé, plus le modèle est fiable et ainsi plus il est représentatif de la réalité. L'interpolation par krigeage du modèle optimum génère une matrice de valeurs prédites à partir des données de terrain (interpolations ponctuelles ou par blocs). Le logiciel statistique GS+ a été utilisé pour réaliser les différentes interpolations [Robertson, 2000].

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Cette section présente les résultats obtenus à la suite des traitements effectués au niveau des données. Les analyses sont regroupées selon les objectifs principaux du travail de recherche. La première partie de cette section vise à répondre aux deux premiers objectifs spécifiques énoncés soit analyser et modéliser la structure spatiale des différentes informations géographiques à l'étude, de même qu'étudier l'efficacité d'une stratification de la parcelle en zones homogènes de gestion sur la variabilité spatiale, l'interprétation de la fertilité et de la productivité des sols. Quant à la deuxième section, elle vise à étudier et modéliser les relations existantes entre les différents paramètres.

4.1 Analyse de la structure spatiale des informations géographiques recueillies

4.1.1 Analyse de la structure spatiale (variographie)

Une analyse de la variographie a permis de caractériser la structure spatiale des différents descripteurs. Ensuite, la distribution spatiale de ces informations a été illustrée à l'aide de cartes produites suite à une interpolation par krigeage (figures 4.1 - 4.12).

Une analyse d'anisotropie a d'abord été réalisée sur les différents paramètres afin de déterminer si une amélioration de la qualité des modèles était observable. Comme ce n'était pas le cas, seuls les modèles théoriques isotropes sont présentés. La majorité des modèles, des 19 indicateurs utilisés pour caractériser la variabilité du sol, sont sphériques ou exponentiels, à l'exception de l'épaisseur de l'horizon Ap qui présente un modèle linéaire (figure 4.17b) à effet pépite pur (C = 0). Il s'agit donc d'une variable aléatoire qui ne démontre aucune structure spatiale. Il est possible de visualiser les courbes des différents semi-variogrammes tracées à partir des données recueillies sur la parcelle (figure 4.13 - 4.17). Quant aux paramètres de la variographie ils apparaissent au tableau 4.1.

Lorsqu'on examine la portée (A_o) du semi-variogramme théorique de chacun des descripteurs, on constate que la stratégie d'échantillonnage utilisée (pas d'échantillonnage minimal variant de 4 à 5 m) a permis de modéliser la variabilité spatiale des descripteurs avec une assez

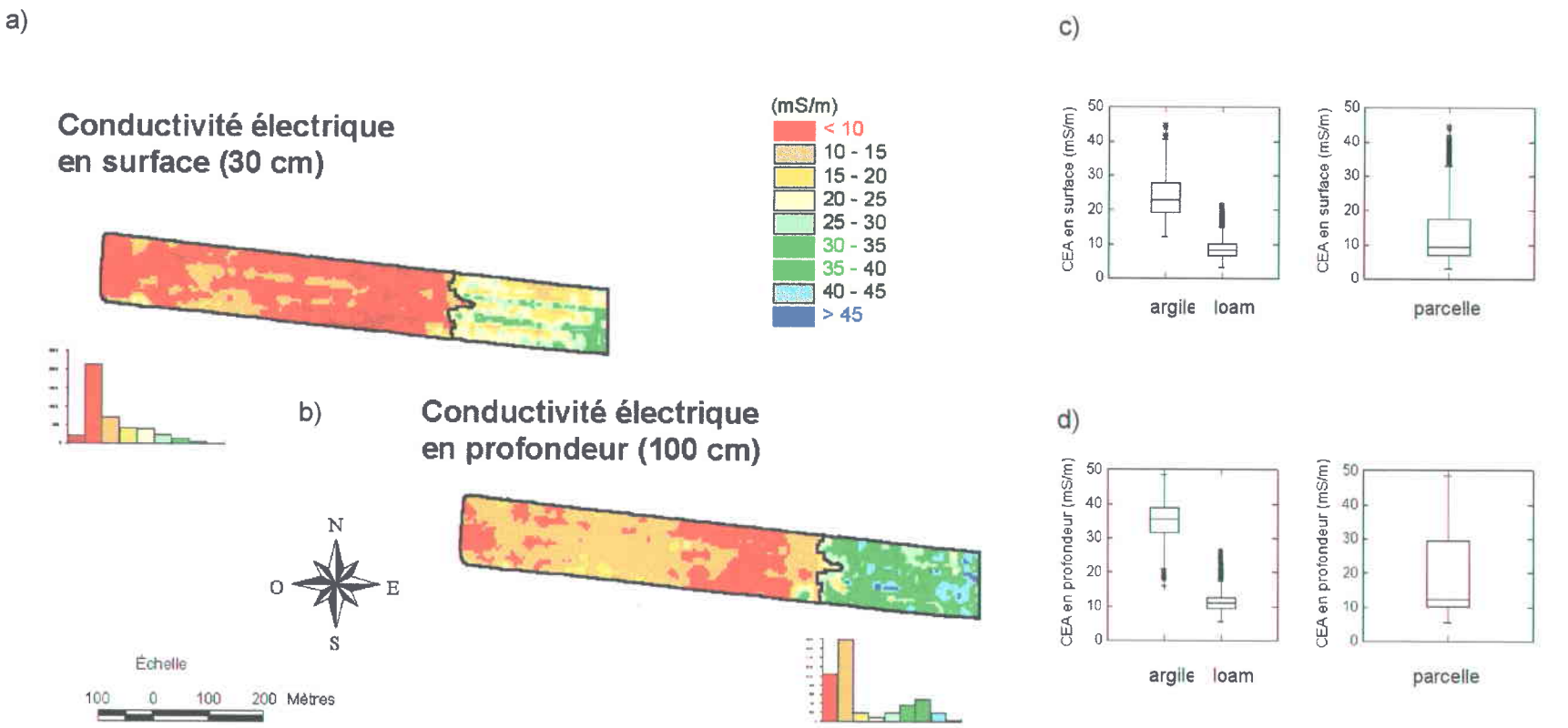


Figure 4.1: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes de la CEA a) en surface et b) en profondeur ainsi qu'une comparaison de la dispersion des valeurs de la CEA c) en surface et d) en profondeur, à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

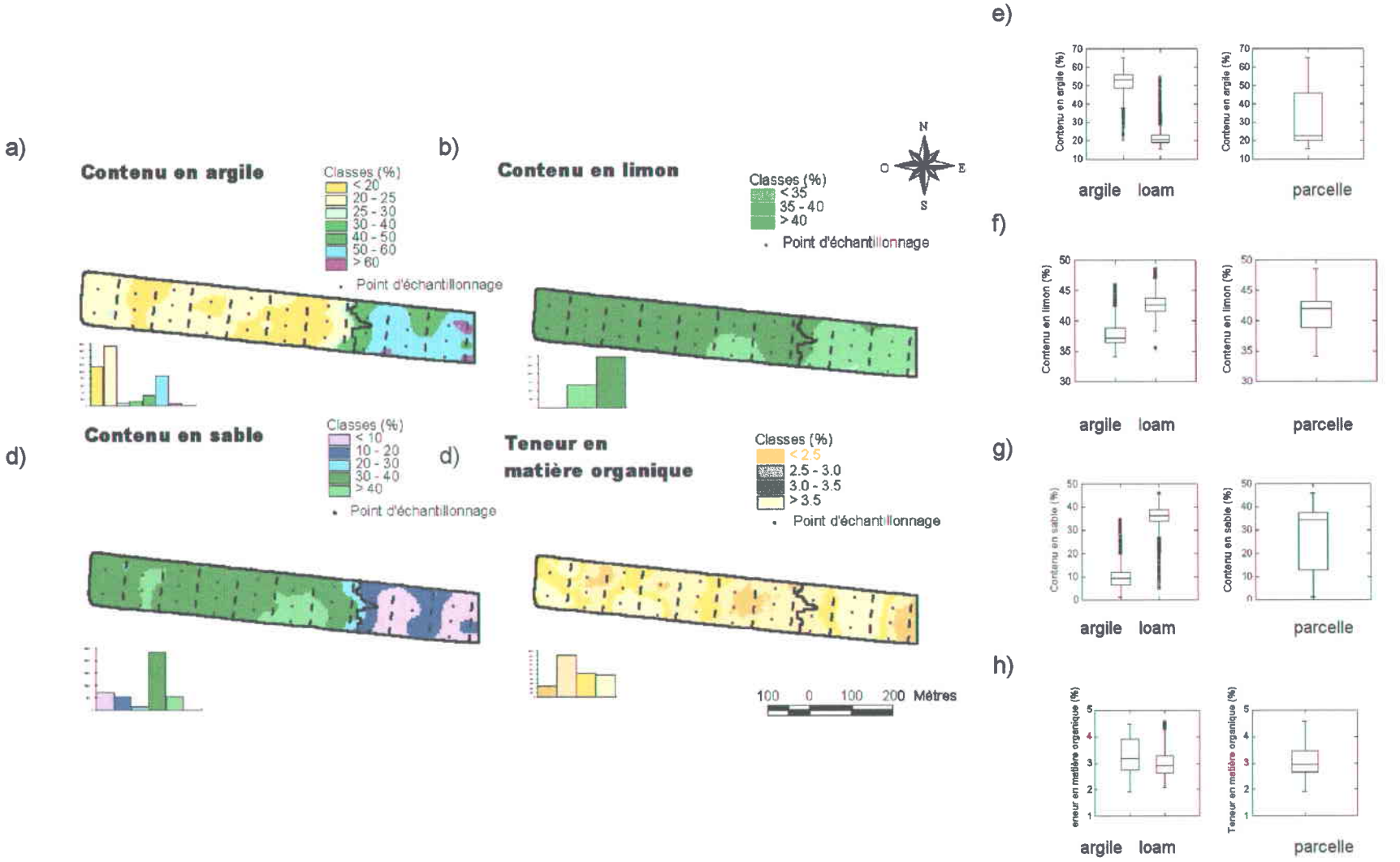


Figure 4.2: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes du contenu a) en argile, b) en limon, d) en sable et e) en matière organique de même qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: e) argile, f) limon, g) sable et h) matière organique à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

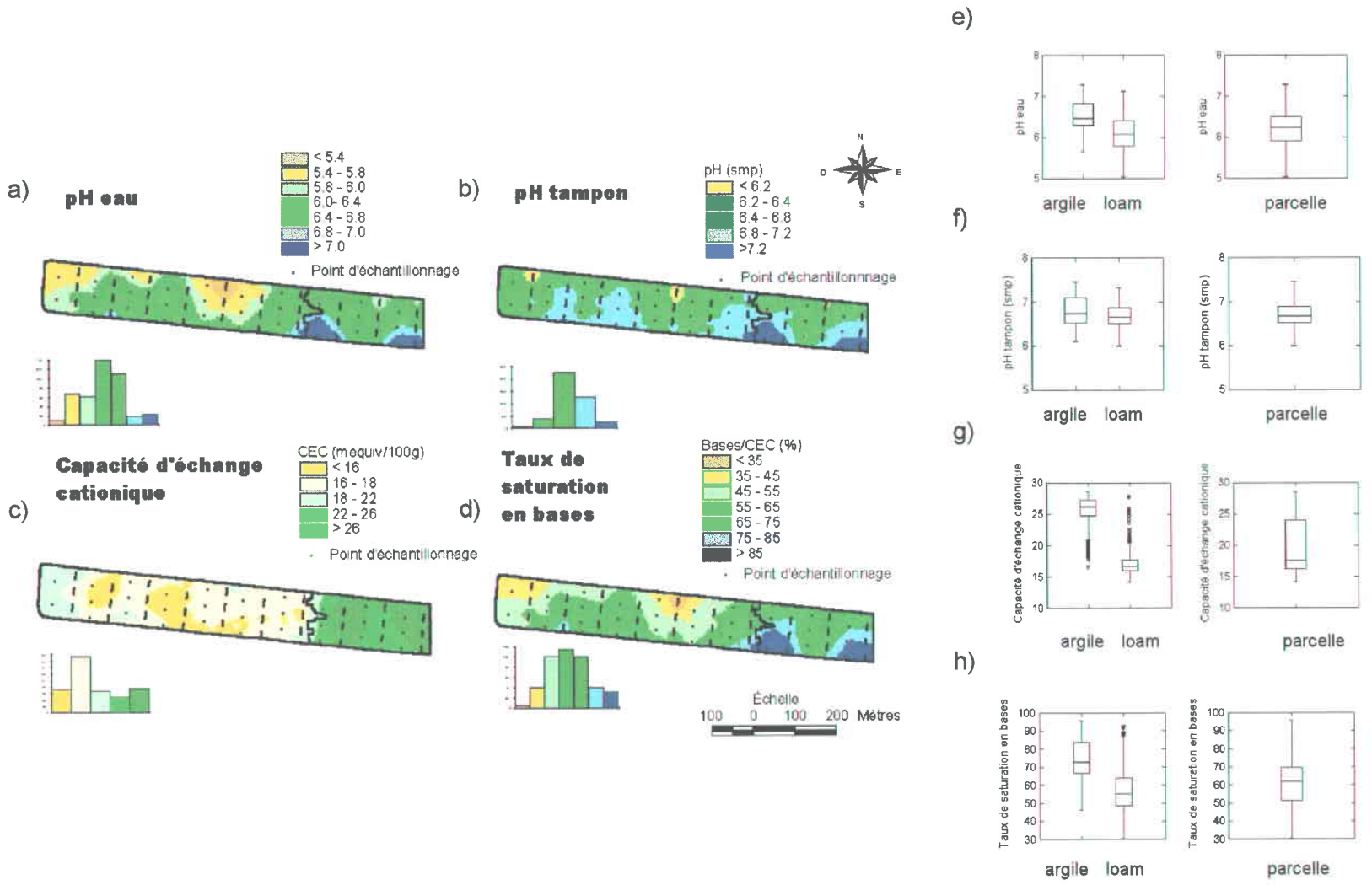


Figure 4.3: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes : a) du pH_{eau} et b) pH_{smp} ainsi que c) la CEC et d) le taux de saturation en bases de même qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: e) pH_{eau}, f) pH_{smp}, g) CEC et h) le taux de saturation en bases, à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

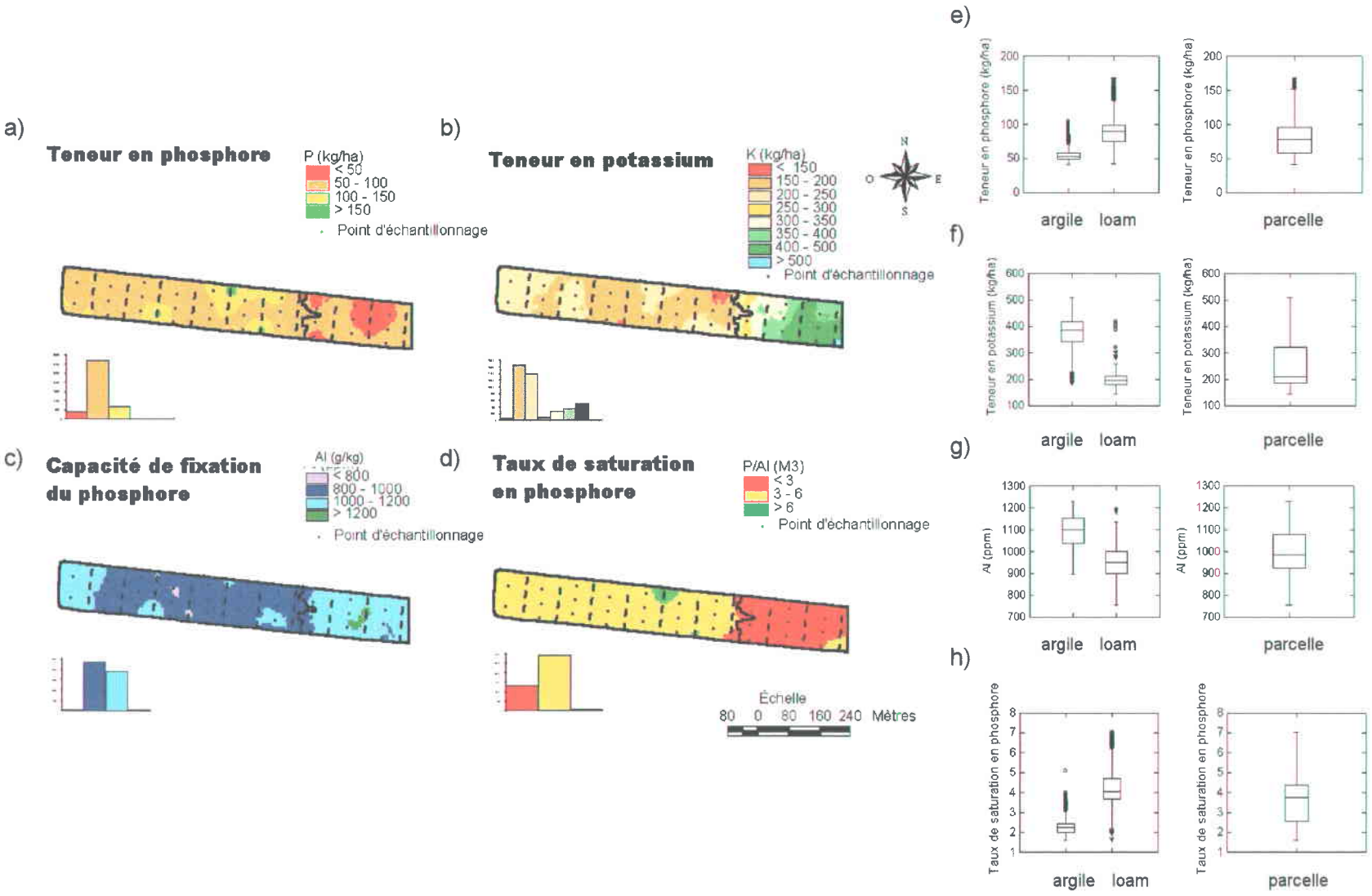


Figure 4.4: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes de la teneur en a) P et en b) K ainsi que d) la capacité de fixation et e) le taux de saturation en P de même qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: e) P, f) K, g) Al et h) P/Al, à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

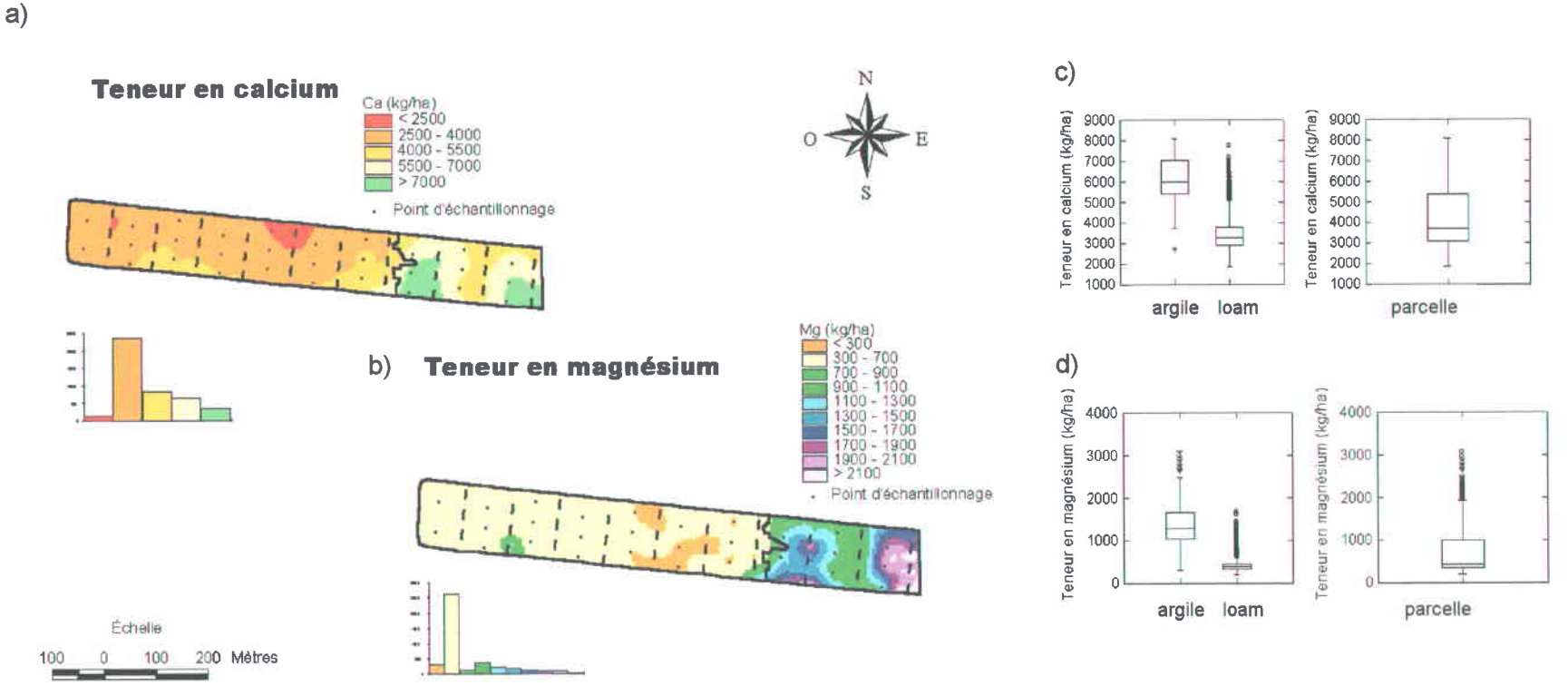


Figure 4.5: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes des éléments secondaires a) Ca et b) Mg ainsi qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: d) Ca et e) Mg, à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

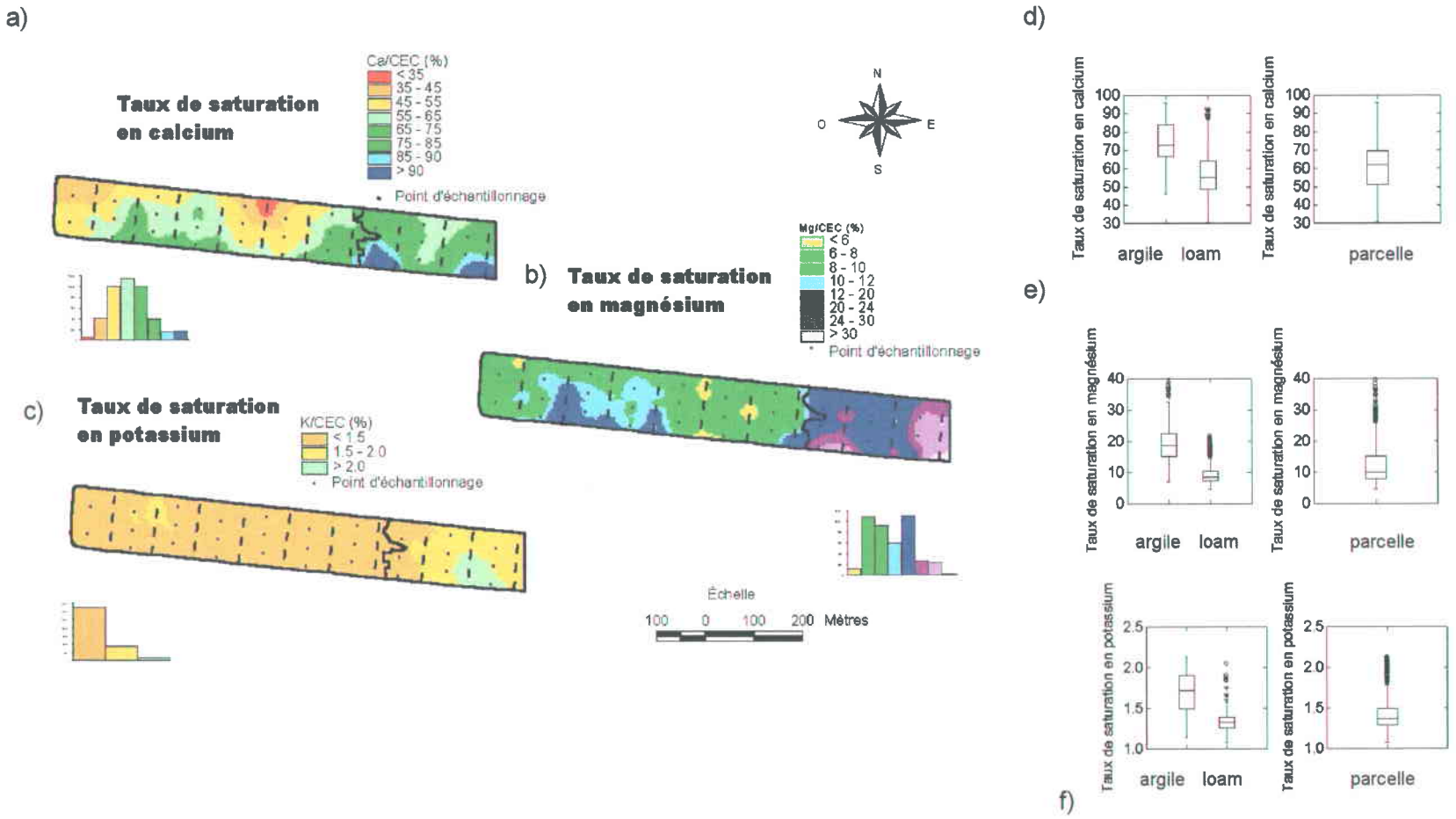


Figure 4.6: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes des taux de saturation en a) Ca, b) Mg et c) K ainsi qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: d) Ca, e) Mg et f) K, à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

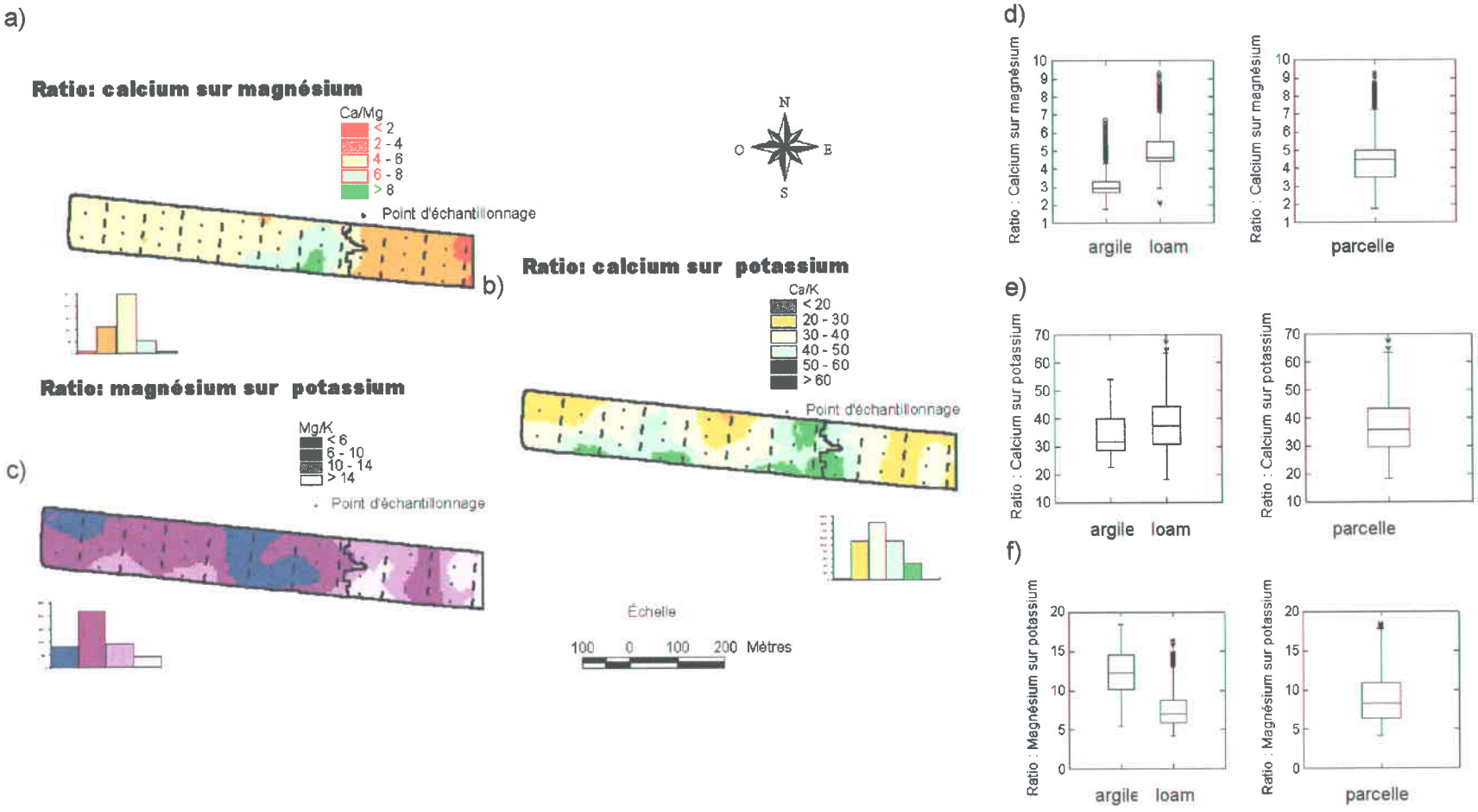
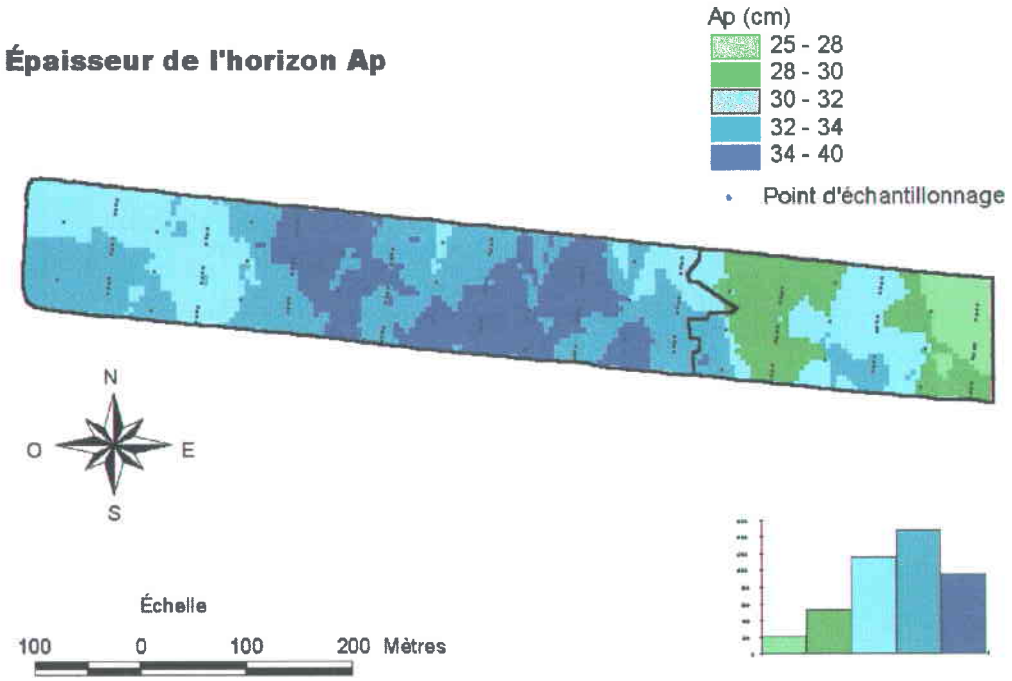


Figure 4.7: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes des ratios a) Ca/Mg, b) Ca/K et c) Mg/K ainsi qu'une comparaison de la dispersion des descripteurs: d) Ca/Mg, e) Ca/K et f) Mg/K, à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

a)



b)

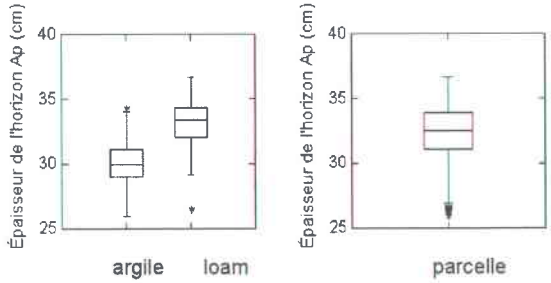
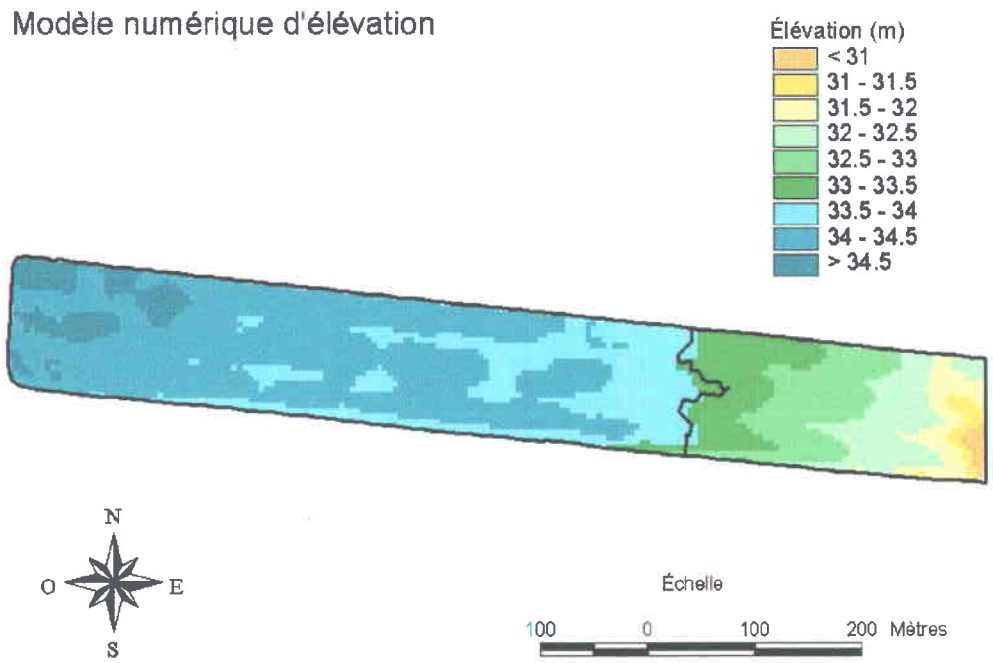


Figure 4.8: Cartes illustrant la variabilité spatiale et histogramme décrivant la distribution de chacune des classes de la teneur en a) épaisseur de l'horizon Ap ainsi que b) une comparaison de la dispersion du descripteur, à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

a)



b)

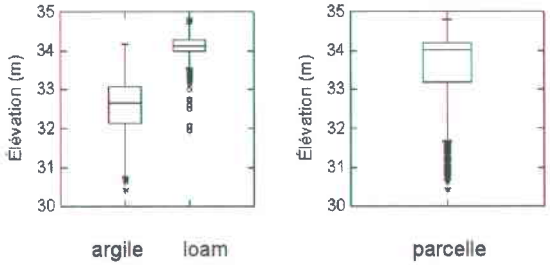


Figure 4.9: Représentation cartographique a) du MNÉ de la parcelle expérimentale ainsi que b) une comparaison de la dispersion du descripteur à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

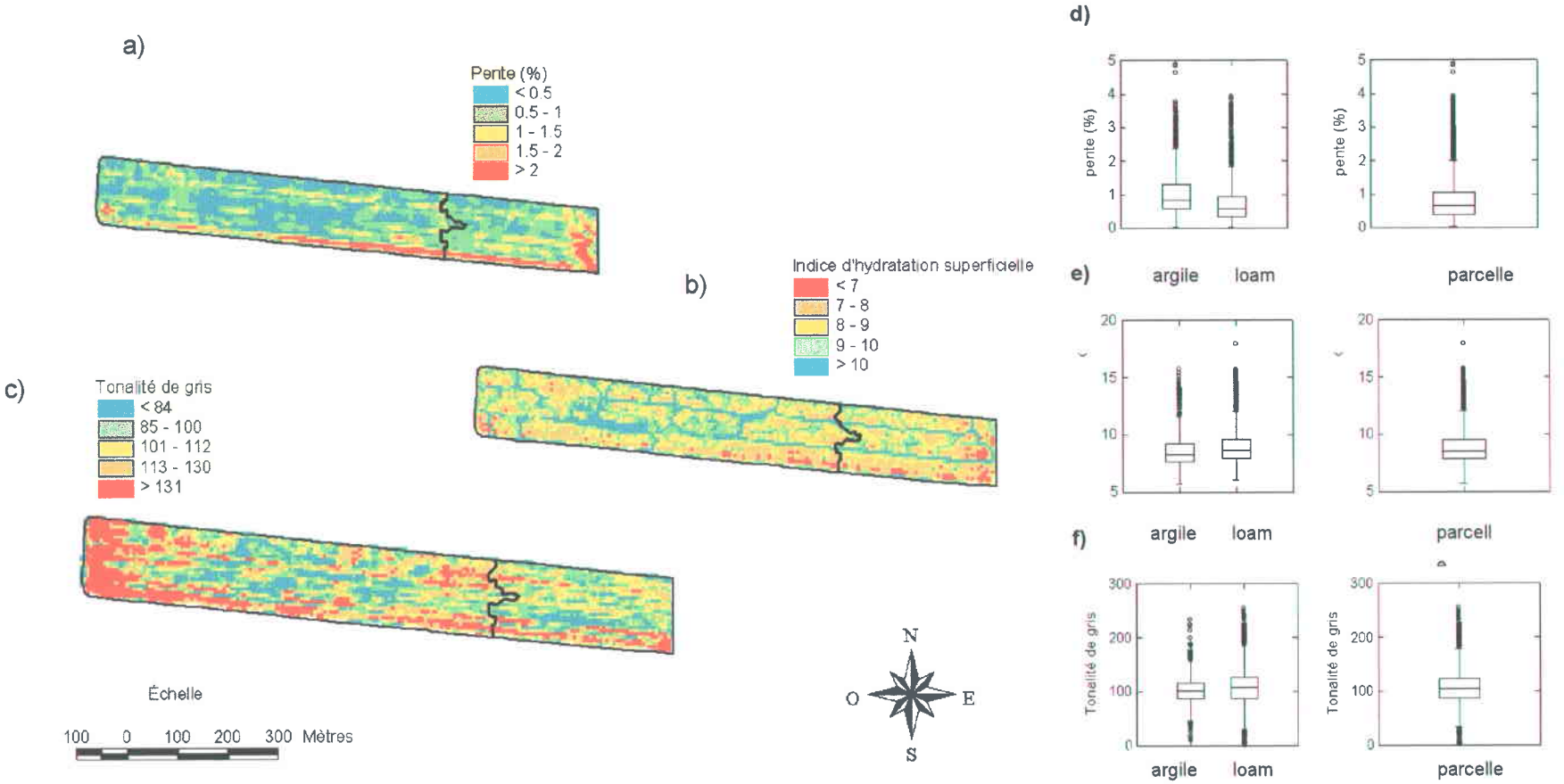


Figure 4.10: Représentation cartographique de la variabilité spatiale a) de la pente, b) de l'indice d'hydratation superficielle et c) de la tonalité de gris ainsi qu'une comparaison de la dispersion de chacun des descripteurs: d) la pente, e) l'indice d'hydratation superficielle et f) la tonalité de gris à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

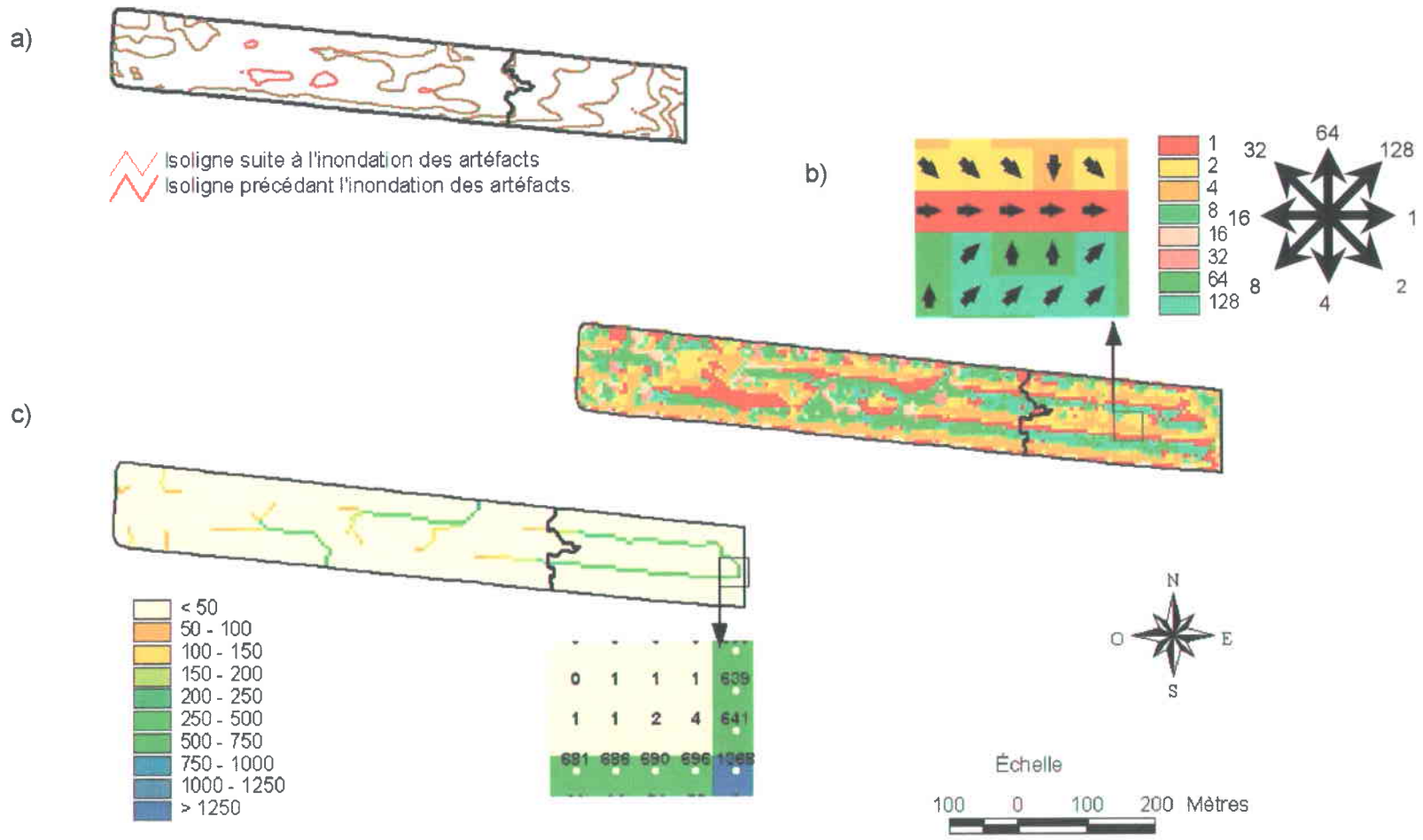


Figure 4.11: Représentation des paramètres hydrologiques du bassin versant (BV): a) inondation des zones de dépressions, b) définition de la direction de l'écoulement et c), simulation des réseaux hydriques superficielles du BV.

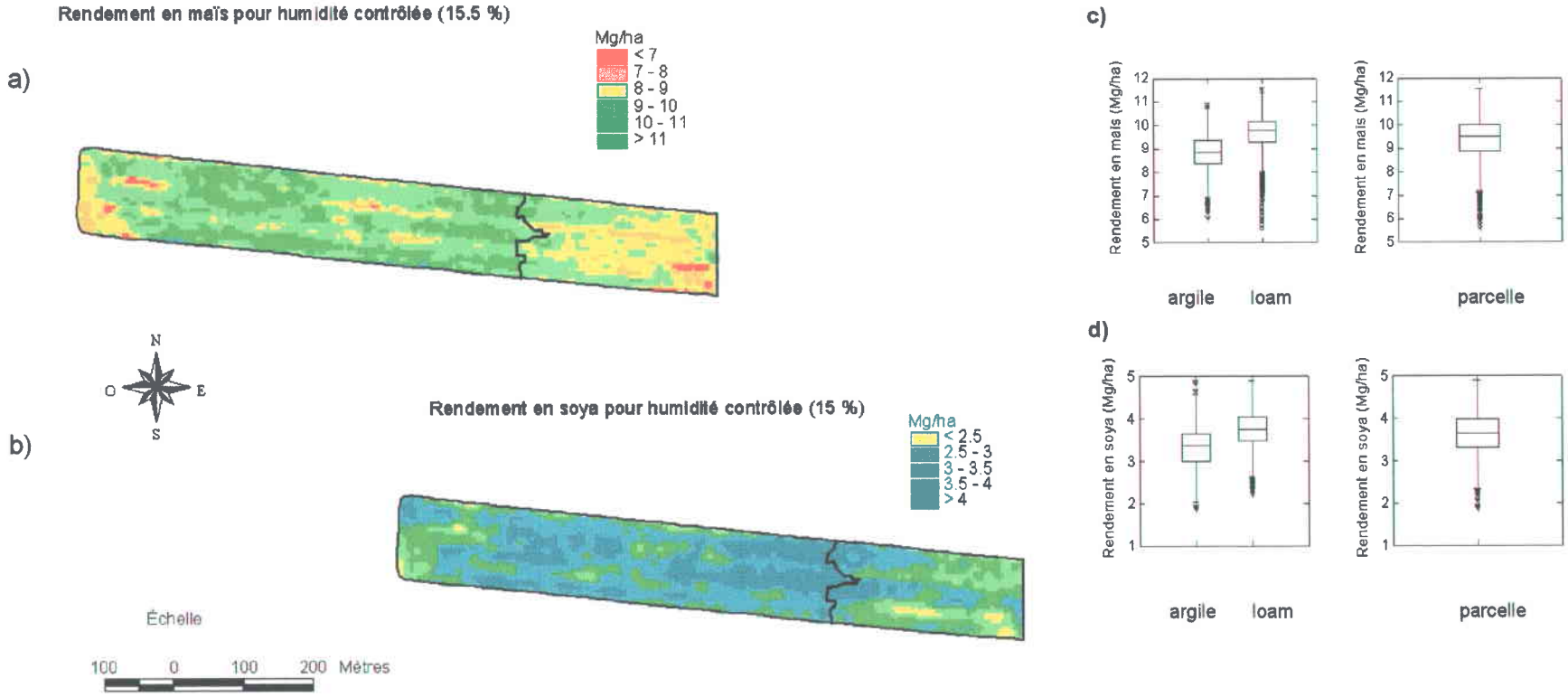
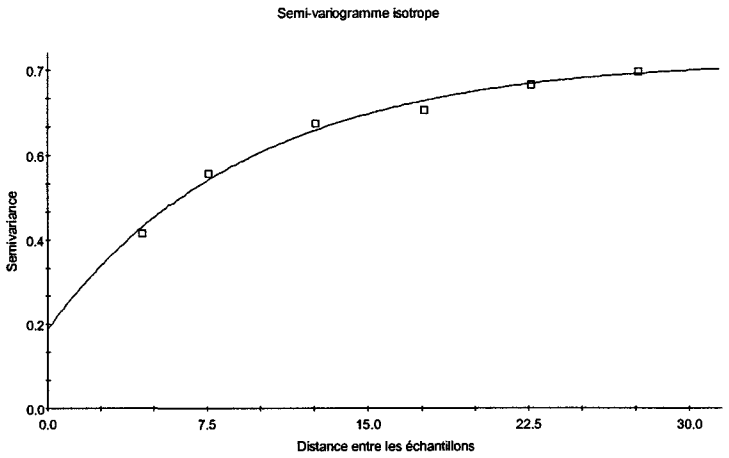
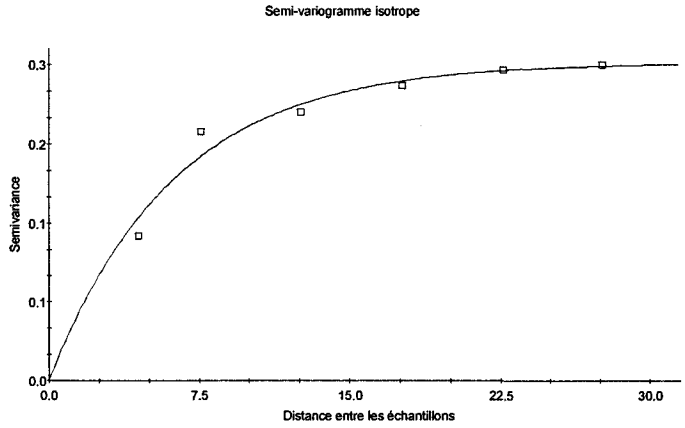


Figure 4.12: Carte de rendement à humidité contrôlée a) en maïs et b) en soya pour les saisons de croissance respectives de 1998 et 1999 ainsi qu'une comparaison de la dispersion de chacune des cultures: c) le maïs-grain et d) le soya, à partir de boîtes à moustaches de Tukey.

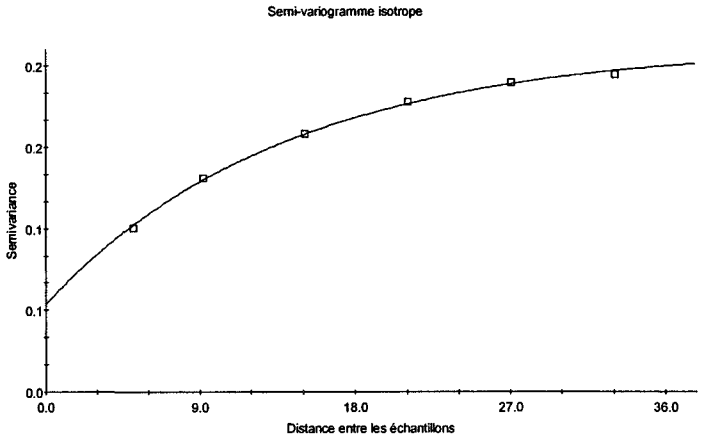
a)



b)



c)



d)

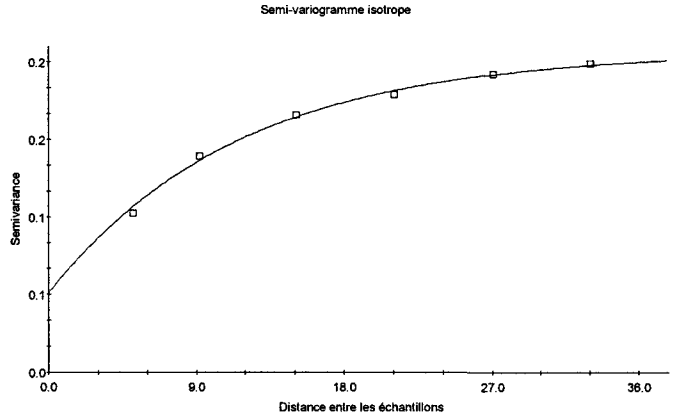
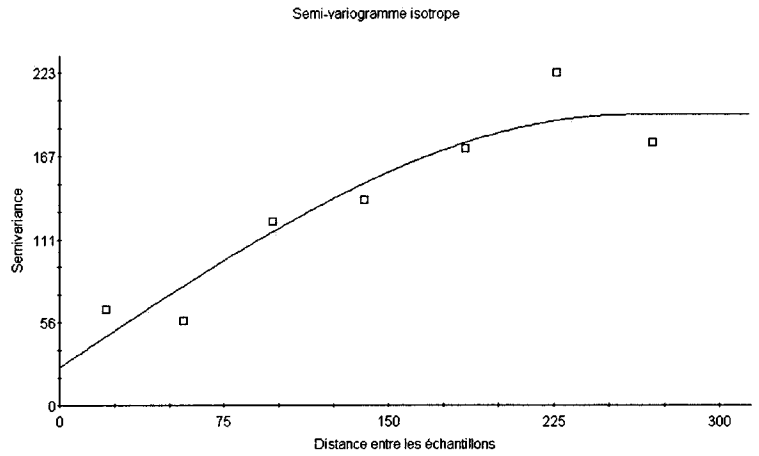
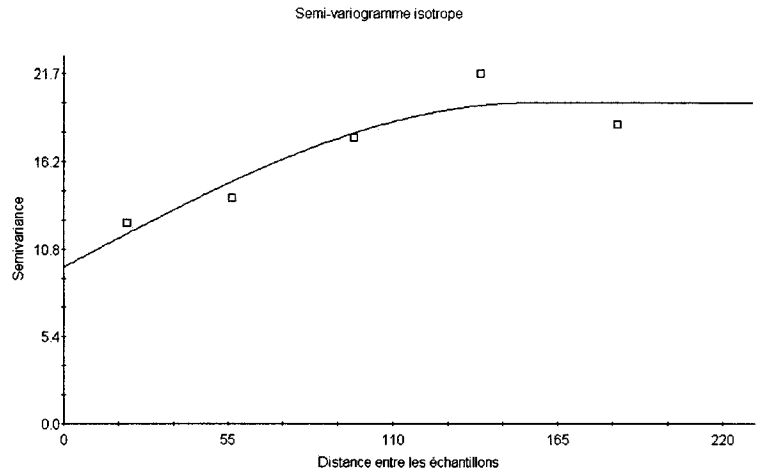


Figure 4.13: Semi-variogramme théorique a) du rendement en maïs-grain, b) de l'humidité du grain du maïs, c) du rendement en soya et d) de l'humidité du grain du soya.

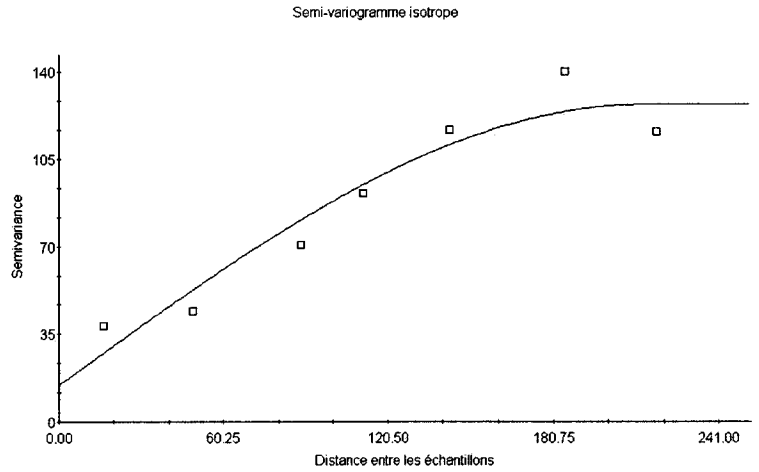
a)



b)



c)



d)

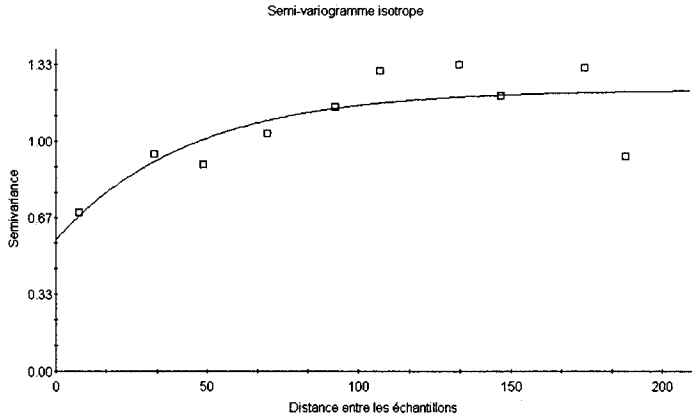
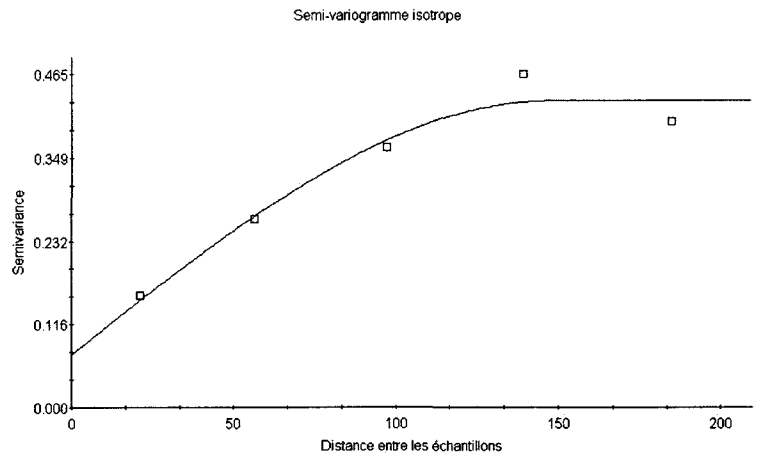
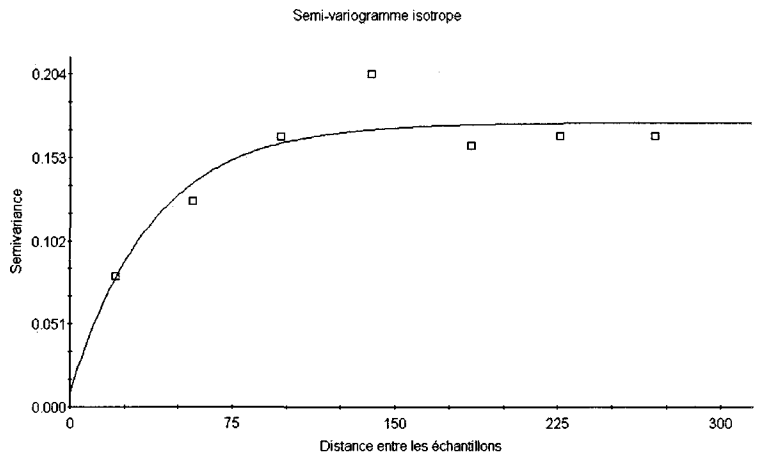


Figure 4.14: Semi-variogramme théorique du contenu a) en argile, b) en limon, c) en sable et d) en matière organique.

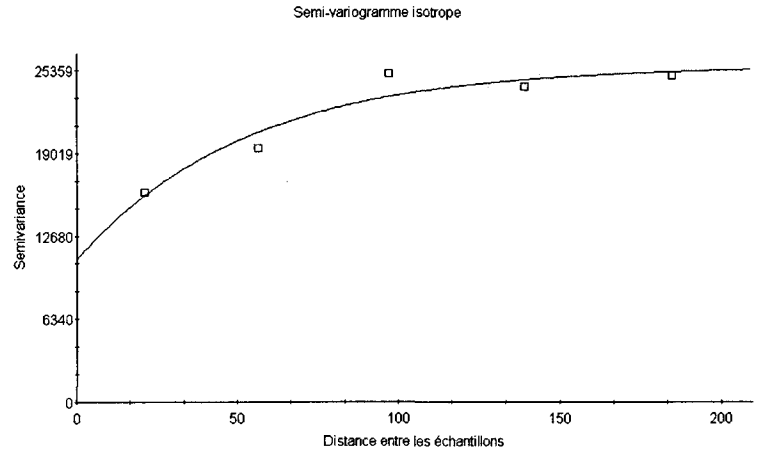
a)



b)



c)



d)

Figure 4.15: Semi-variogramme théorique du a) pH_{eau}, b) pH_{smp} et de c) la teneur en aluminium.

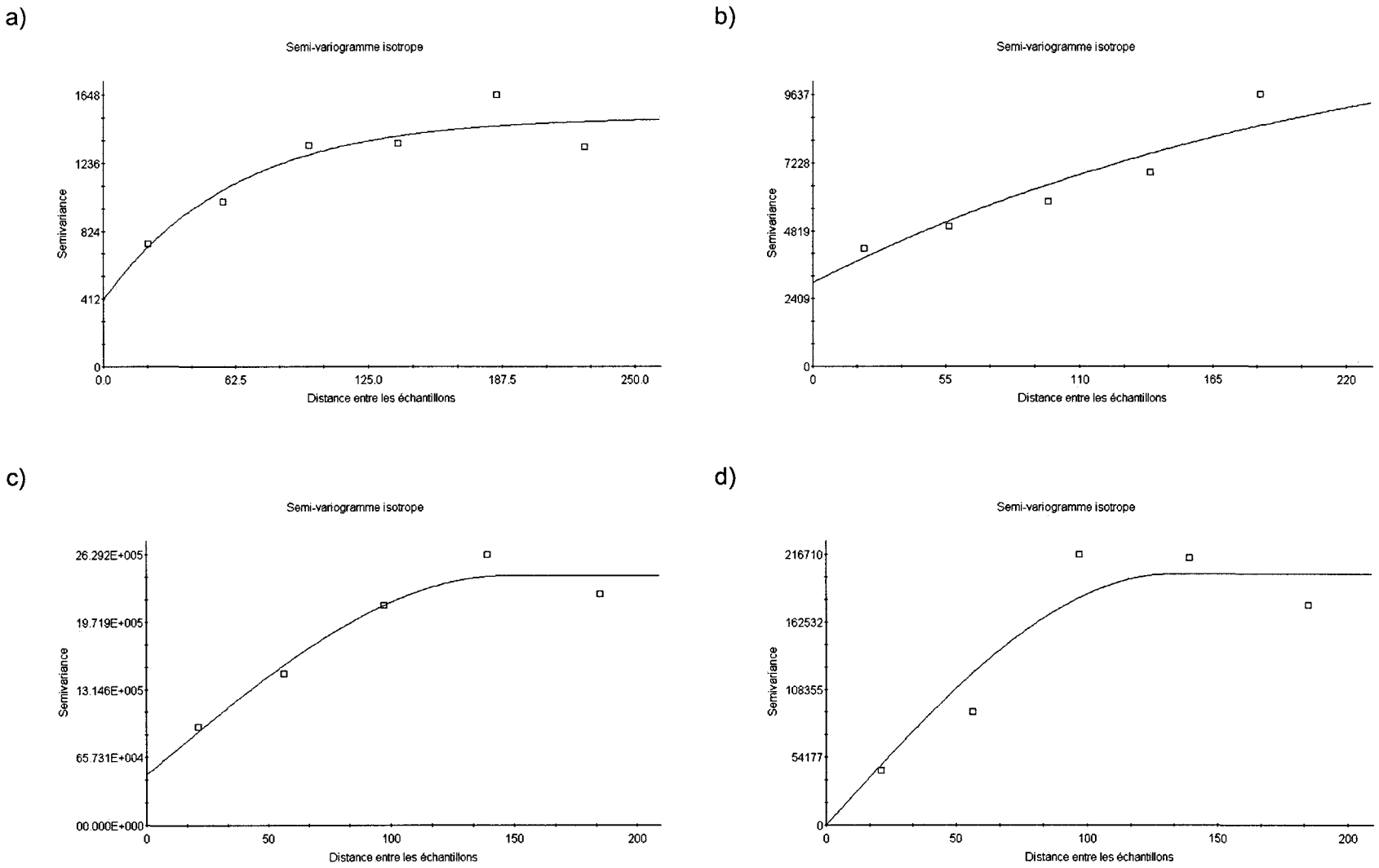
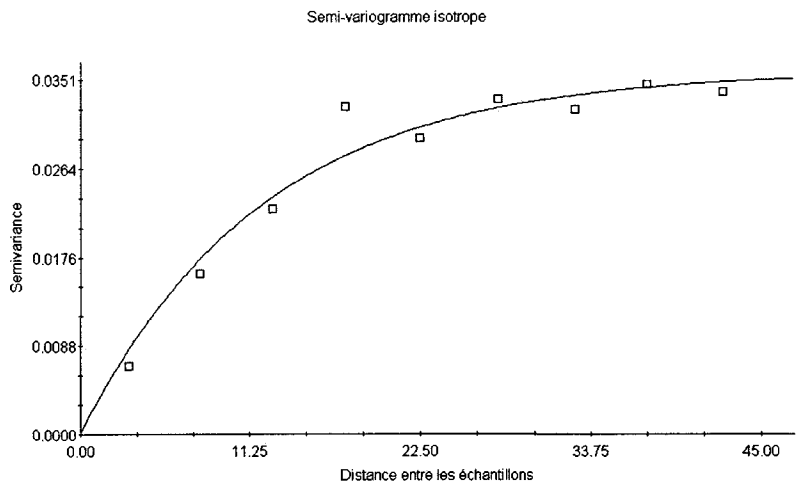
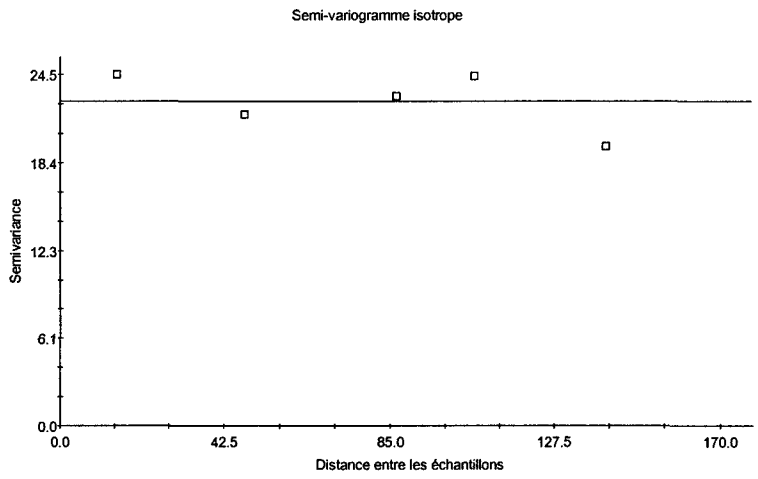


Figure 4.16: Semi-variogramme théorique de la teneur a) en phosphore, b) en potassium c) en calcium et d) en magnésium.

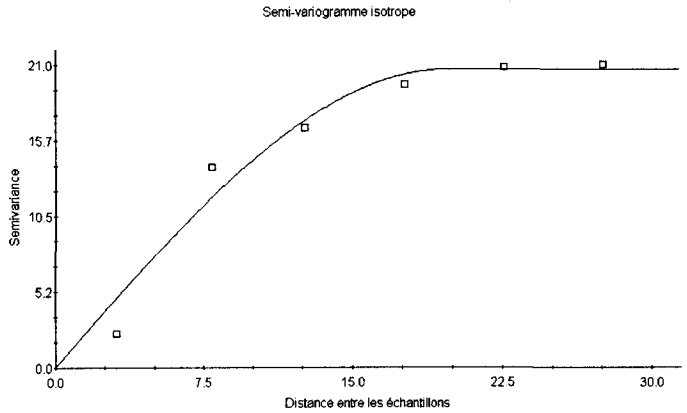
a)



b)



c)



d)

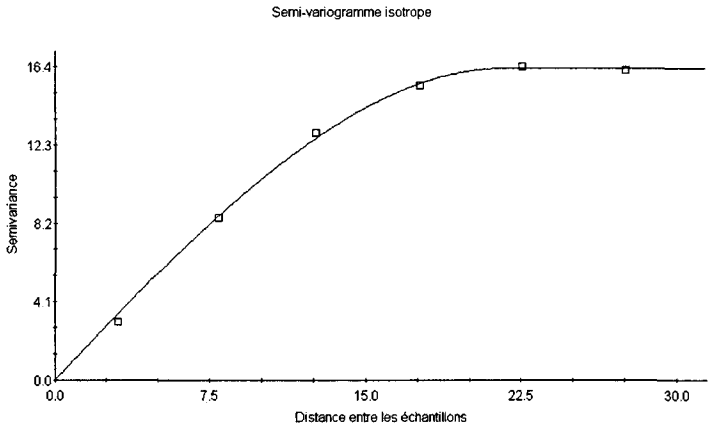


Figure 4.17: Semi-variogramme théorique de a) la topographie, b) l'épaisseur de l'horizon Ap et de la CEA c) en surface et d) en profondeur.

bonne fiabilité et de révéler des structures d'organisation spatiale plus fines pour les données mesurées avec une forte densité (v. g. rendement, CEA et MNT) et plus grossières pour les indicateurs de qualité des sols mesurés avec des densités plus faibles. Cependant la densité d'échantillonnage retenue pour les indicateurs de fertilité n'a pas été suffisante pour caractériser avec fiabilité la variabilité spatiale de certains indicateurs comme le pH_{smp} et la teneur en MO. Une stratégie d'échantillonnage commerciale (un échantillon par hectare) aurait donc permis de modéliser la macrostructure d'organisation spatiale du sable, de l'argile, de la fraction limoneuse fine et du potassium. Toutefois, si l'on établit l'intervalle d'échantillonnage à la demi-valeur de la portée (A/2) [Nolin et *al.*, 2000], il n'est pas possible de saisir la structure spatiale beaucoup plus fine du pH_{smp}, de la teneur en MO, en P et en Al ($A_o/2 < 45$ m).

Le rapport C/C_o+C qui permet d'évaluer la portion de la variance totale (C_o+C) qui est expliquée par la composante structurée (C) de la variabilité spatiale comparativement à la composante aléatoire(C_o), varie d'une propriété à l'autre. Les fractions limoneuses et la teneur en MO montrent les ratios les plus faibles. Ces propriétés présentent donc une proportion plus grande de variation aléatoire. On peut donc douter de la fiabilité des cartes de fertilité générées par krigeage à partir des modèles isotropes.

La qualité du modèle du semi-variogramme isotrope théorique peut être évaluée à partir de la valeur du coefficient de détermination de la validation croisée (R^2_{vc}). Elle semble bonne pour le MNÉ, le rendement en maïs-grain et en soya, le contenu en sable, en argile, la fraction limoneuse fine ainsi que pour la teneur en P, K, Mg et Ca ($R^2_{vc}>0,50$). Toutefois, cet indice est plus faible, pour l'humidité du grain des deux cultures, le contenu en MO, le pH_{smp} et la fraction limoneuse moyenne, R^2_{vc} étant respectivement de 0,49, 0,45, 0,30, 0,47 et 0,42.

Tableau 4.1: Résultats des paramètres des semi-variogrammes théoriques isotropes

Propriétés	Intervalle	Distance (m)	Modèle	Effet de pépite (C_o)	Portée (Ao)	Portée effective * (m)	C/C_o+C	R^2_{vc}
Élévation	45	5	Exponentiel	0,00	12	36	0,98	1,00
Rendement en maïs-grain	30	5	Exponentiel	0,2	9	28	0,77	0,53
Humidité du grain du maïs-grain	30	5	Exponentiel	0,0	6	19	1,00	0,49
Rendement en soya	36	6	Exponentiel	0,1	14	42	0,75	0,54
Humidité du grain du soya	36	6	Exponentiel	0,1	12	35	0,76	0,45
Épaisseur de l'horizon Ap			Linéaire					
Contenu en sable	241	33	Sphérique	14,5	213	213	0,89	0,86
Fraction limoneuse fine	220	40	Sphérique	4,32	202	202	0,51	0,61
Fraction limoneuse moyenne	220	40	Sphérique	3,03	154	154	0,51	0,42
Contenu en argile	300	40	Sphérique	25,7	258	258	0,87	0,82
pH_{eau}	200	40	Sphérique	0,04	147	147	0,83	0,51
pH_{smp}	300	40	Exponentiel	0,01	38	114	0,95	0,47
Teneur en matière organique	200	20	Exponentiel	0,57	44	132	0,53	0,30
Teneur en phosphore	250	40	Exponentiel	406	61	183	0,73	0,53
Teneur en potassium	220	40	Exponentiel	2980	230	690	0,77	0,67
Teneur en magnésium	200	40	Sphérique	100	131	131	1,00	0,89
Teneur en calcium	200	40	Sphérique	489000	146	149	0,80	0,68
Teneur en aluminium	200	40	Exponentiel	10870	52	156	0,58	0,37
CEA en surface	30	5	Sphérique	0,01	19,7	20	1,00	0,94
CEA en profondeur	30	5	Sphérique	0,01	21,6	22	1,00	0,96

*Pour le modèle exponentiel la valeur de A_o doit être multipliée par 3 afin d'estimer la valeur de la portée effective.

4.1.2 Caractérisation du milieu physico-chimique de la parcelle et stratification de la parcelle en zones d'aménagement

Les résultats des analyses statistiques de la CEA et des indicateurs de fertilité du sol sont présentés au tableau 4.2. La moyenne de la CEA en surface est de 13 mSm^{-1}, alors qu'en profondeur, elle est de 18 mSm^{-1}. L'intervalle, entre le minimum et le maximum, est très large ($\geq$ 45 mS m^{-1}) Les deux CV calculés confirment l'intensité de la variabilité spatiale de ce descripteur. Ils appartiennent à la classe de variabilité très élevée avec des valeurs respectives de 65 % et de 64 %. Des valeurs d'asymétrie positives et négatives ont été calculées. Une kurtose négative caractérise un aplatissement par rapport à la courbe en forme de cloche. Ces résultats amènent le rejet de l'hypothèse de la normalité.

L'ensemble des analyses physico-chimiques a été mesuré pour l'horizon Ap, d'épaisseur moyenne de 32 cm, dont le CV de 16 % est modéré. Des contenus moyens en argile de 28 % et en sable de 31 % ont des CV très élevés, respectivement 53 % et 55 %. La teneur moyenne en MO de 3 % est identifiée comme pauvre, cependant les valeurs maximales atteignent 6 % pour certains échantillons et pourraient appartenir à une classe moyenne [Association des fabricants d'engrais du Québec, 1999]. En fait, le CV de 35 % est relativement élevé.

Le pH_{eau} varie de 4,9 à 7,8 avec un CV de 10 % (faible). Cependant une telle variation du pH devrait être considérée comme plus élevée. La faiblesse du CV résulte de l'échelle logarithmique sous laquelle il est exprimé. Une moyenne de pH_{eau} de 6,3 est légèrement inférieure à la moyenne optimum de 6,5 recommandée pour la culture du maïs-grain et du soya [AFEQ, 1999] et pourrait être considérée comme satisfaisante pour répondre aux besoins de ces cultures. Cependant l'étendue de la variation du pH indique que certaines parties du champ sont sous des conditions acides où l'efficacité des intrants (N et P) diminue considérablement.

Les éléments majeurs (P et K) ainsi que les éléments secondaires (Mg et Ca) présentent des CV élevés et très élevés, soit respectivement 47, 47, 82 et 42 %. Avec une teneur moyenne en P disponible de 80,9 kg ha^{-1}, ce champ est considéré comme pauvre en P. Par contre, des teneurs moyennes en K disponible de 255 kg ha^{-1} caractérisent un sol riche [Conseil des

productions végétales du Québec, 1996]. La classification des niveaux de fertilité du sol établie par Nolin et Lamontagne (1990) souligne qu'un contenu moyen en Mg disponible de 763 kg ha^{-1} est élevé, alors qu'une moyenne en Ca disponible de 4412 kg ha^{-1} constitue une valeur modérée. Comme les analyses ont permis d'enregistrer des teneurs moyennes d'Al extrait au Mehlich-III de 995 mg kg^{-1}, ce champ peut être considéré comme ayant une faible capacité de fixation du phosphore [CPVQ, 1996].

L'examen des statistiques descriptives ainsi que l'analyse visuelle des distributions de fréquences, de chacune des variables, caractérisant le milieu physico-chimique de la parcelle, ont montré que plusieurs descripteurs présentaient une distribution bi-modale (figure 4.18 et annexe 1). Cela ne répond pas parfaitement au critère de la loi normale, basée sur une distribution unimodale de probabilités. Compte tenu de l'allure bi-modale des propriétés de la parcelle étudiée, une analyse de regroupement a été réalisée dont le nombre de groupes a été fixé à deux (K = 2). Les données de CEA des sols ont été utilisées pour ce groupement parce qu'elles sont mesurées avec une forte densité et présentent une bonne relation avec les propriétés de sols bien reliées aux rendements des cultures comme la texture, le drainage, la capacité de rétention en eau et les propriétés du sous-sol.

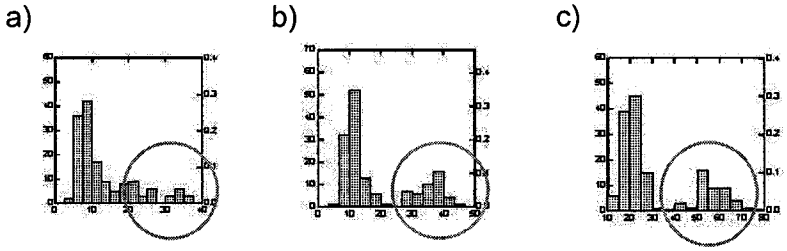


Figure 4.18: Histogramme fréquentiel de la densité de distribution de la population: a) de la CEA de surface, b) de la CEA en profondeur et c) du contenu en argile.

L'analyse à K moyenne a créé deux sous-ensembles d'échantillons unimodaux permettant ainsi un plus grand respect du critère de la loi normale (figure 4.19 et annexe 1).

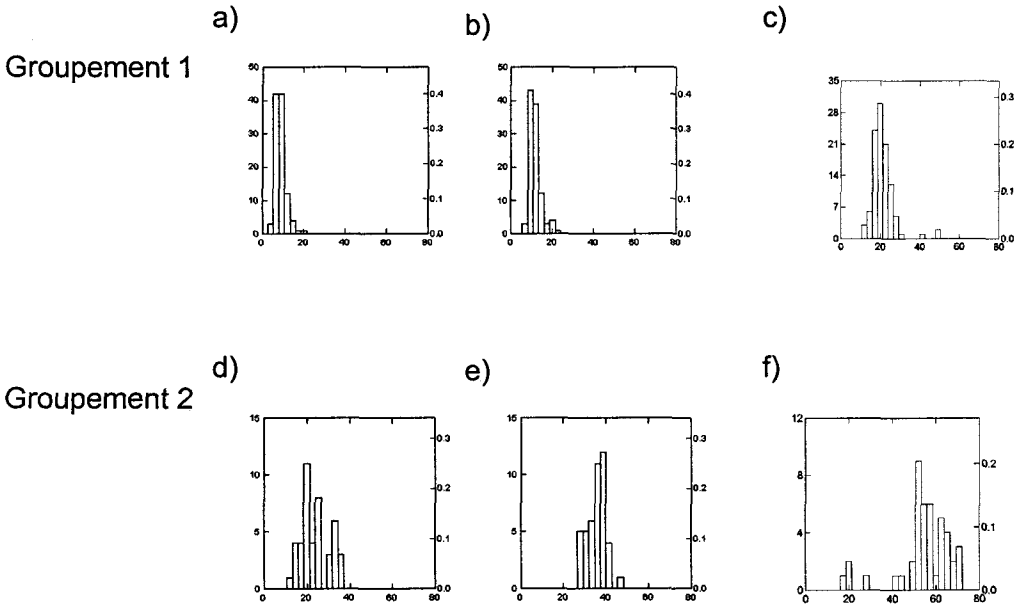


Figure 4.19: Histogramme fréquentiel de la densité de distribution de la population : groupement 1 : a) CEA de surface, b) CEA en profondeur, c) contenu en argile ; groupement 2 : d) CEA de surface, e) CEA en profondeur et f) contenu en argile.

Les deux groupes formés appartiennent à des classes texturales distinctes. Selon l'abaque des classes texturales [CEPPAC, 1987], le groupement 1 (zone loameuse) présente une texture moyenne de surface classée loam limoneux (22 % argile), alors que le groupement 2 (zone argileuse) englobe les sols avec une texture moyenne de surface classée « argile » (54 % argile). La figure 4.20 présente une illustration de chacun des groupements. On peut constater que le groupement a généré deux zones géographiques bien distinctes.

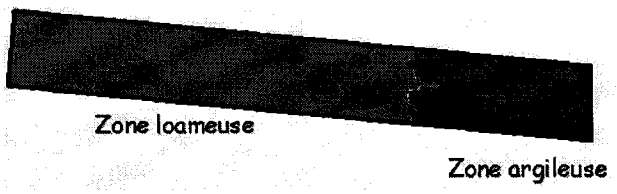


Figure 4.20: Représentation cartographique de la stratification de la parcelle en deux zones d'aménagement au moyen de la méthode de groupement à k moyenne effectuée à partir des données de CEA.

4.1.3 Caractérisation du milieu physico-chimique des zones d'aménagement

Les deux sous-populations échantillonnées présentent une certaine déviation par rapport à la normalité pour quelques-uns des descripteurs considérés. Les coefficients d'asymétrie et de kurtose illustrent cette tendance (tableau 4.2). Des transformations ont été effectuées en vue d'améliorer la distribution des variables. Comme les résultats n'étaient pas significatifs, les données n'ont pas été transformées. Par conséquent, le rejet de l'hypothèse de la normalité a été retenu.

Les représentations graphiques sous forme de boîtes à moustaches (figure 4.1c et d), mettent en évidence les différences de CEA mesurées dans les deux zones texturales. Il est aussi possible de constater que l'écart entre les valeurs de CEA est plus important dans la zone argileuse que dans la zone loameuse. La distribution des données de l'ensemble de la parcelle semble influencer les valeurs de la zone loameuse. Ceci s'explique par une plus grande superficie et par une plus grande quantité de données appartenant à cette zone par rapport à la zone argileuse.

Nugteren et *al.* (2000) rapportent que les valeurs de CEA les plus élevées sont associées aux zones d'élévation faible alors que les données de CEA faibles correspondent aux zones plus élevées. Cela coïncide avec les valeurs mesurées à l'intérieur de la parcelle à l'étude. La zone loameuse (plus élevée) présente une moyenne de CEA relativement faible tant en surface qu'en profondeur, soit respectivement 9 mSm^{-1} et 12 mSm^{-1} alors que la zone argileuse (plus basse) présente des moyennes de CEA de 24 mSm^{-1} et 36 mSm^{-1}.

La stratification de la parcelle se traduit par des propriétés physico-chimiques distinctes pour chacun des groupes. On note une diminution de la moyenne en K, en Mg et en Ca disponibles, dans la zone loameuse, résultante probable d'une valeur plus faible de capacité d'échange cationique qui accompagne une diminution de la teneur en argile. Par contre dans la zone loameuse, les teneurs moyennes en P sont plus élevées que dans la zone argileuse (91 kg ha^{-1} *vs* 57 kg ha^{1}) tandis que la teneur en aluminium (indicateur de la capacité de fixation du phosphore) moyenne est plus faible (949 mg kg^{-1} *vs* 1104 mg kg^{-1}). L'importance de la teneur en argile sur la capacité de fixation du phosphore a été soulignée par Leclerc et *al.*

(2001). Suite au groupement, une diminution des valeurs de CV est observée pour la plupart des descripteurs de fertilité étudiés. Ceci est relié à une plus grande homogénéité des sols à l'intérieur des strates délimitées à l'intérieur du champ.

Le niveau d'acidité des sols de chacune des deux zones appartient à deux classes de réaction distinctes [Tabi et *al.*, 1990]. Un pH_{eau} moyen de la zone loameuse de 6,7 classe ce sol à un niveau neutre alors que le sol argileux (pH_{eau} = 6,5) classe le sol comme étant faiblement acide. Comme l'Al est relié à l'acidité du sol et que les teneurs en K, Ca et Mg ont pour effet de le neutraliser, il est normal que ces propriétés différencient chacune des zones. Par exemple, la zone argileuse plus acide est caractérisée par une teneur en Al plus élevée.

Tableau 4.2: Statistiques descriptives des indicateurs de fertilité du sol issues des données brutes

	Propriétés	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (%)	Asymétrie	Kurtose
CEA en surface (mS m^{-1})	Parcelle	3	48	13	8,3	65	1,50	1,87
	Zone loameuse	3	24	9	3,3	38	1,04	1,15
	Zone argileuse	10	48	24	7,7	32	0,72	0,21
CEA en profondeur (mS m^{-1})	Parcelle	2	50	18	11,5	64	1,07	-0,36
	Zone loameuse	2	38	12	3,5	30	1,94	7,56
	Zone argileuse	16	50	36	6,0	17	-0,40	0,39
Épaisseur de l'horizon Ap (cm)	Parcelle	23	50	32	5,1	16	0,80	1,00
	Zone loameuse	24	47	33	4,5	13	0,83	0,96
	Zone argileuse	23	50	30	5,5	19	1,88	4,35
Contenu en sable (%)	Parcelle	0,2	50,7	27,8	14,6	53	-0,70	-0,90
	Zone loameuse	12,7	50,7	36,0	6,8	19	-0,72	1,42
	Zone argileuse	0,2	35,3	8,3	8,3	100	1,75	3,41
Fraction limoneuse fine (%)	Parcelle	5,5	27,8	12,1	3,7	31	0,90	1,20
	Zone loameuse	5,5	17,3	10,4	2,1	21	0,24	0,60
	Zone argileuse	8,3	27,8	16,4	3,2	20	0,35	3,62
Fraction limoneuse moyenne (%)	Parcelle	8,0	28,3	17,2	3,0	18	0,30	1,80
	Zone loameuse	13,7	28,3	18,4	2,5	13	1,20	3,78
	Zone argileuse	8,0	20,7	14,2	2,3	16	-0,11	1,35
Contenu en argile (%)	Parcelle	11,5	70,1	31,2	17,1	55	1,00	-0,60
	Zone loameuse	11,5	50,1	21,5	5,8	27	2,52	10,20
	Zone argileuse	18,5	70,1	54,2	12,4	23	-1,53	2,60
Teneur en matière organique (%)	Parcelle	0,7	6,1	3,1	1,1	35	0,60	0,10
	Zone loameuse	0,7	6,1	3,0	1,1	38	0,74	0,26
	Zone argileuse	1,2	5,1	3,2	0,9	30	0,01	-0,42
pH_{eau}	Parcelle	4,90	7,80	6,30	0,6	10	0,10	-0,50
	Zone loameuse	4,90	7,80	6,17	0,6	10	0,33	-0,10
	Zone argileuse	5,70	7,60	6,59	0,5	8	-0,13	-1,16
pH_{smp}	Parcelle	5,90	7,60	6,80	0,40	6	0,00	-0,80
	Zone loameuse	5,90	7,60	6,71	0,4	6	0,06	-0,37
	Zone argileuse	6,00	7,50	6,85	0,5	6	-0,20	-1,31
Teneur en phosphore (kg ha^{-1})	Parcelle	30,0	230,0	80,9	38,2	47	1,60	2,70
	Zone loameuse	30,0	230,0	91,0	39,7	44	1,38	1,87
	Zone argileuse	30,0	140,0	56,6	18,8	33	2,30	8,38
Teneur en potassium (kg ha^{-1})	Parcelle	90	630	255	121,1	47	1,00	0,20
	Zone loameuse	90	445	193	63,6	33	1,39	3,06
	Zone argileuse	260	630	403	92,6	23	0,58	-0,39
Teneur en aluminium (mg kg^{-1})	Parcelle	440	1300	995	163,1	16	-0,50	0,40
	Zone loameuse	440	1290	949	161,8	17	-0,28	0,47
	Zone argileuse	900	1300	1104	105,4	10	-0,02	-0,74
Teneur en calcium (kg ha^{-1})	Parcelle	1600	9300	4412	1845,1	42	0,90	0,10
	Zone loameuse	1600	9300	3556	1226	35	2,03	6,90
	Zone argileuse	4000	9100	6414	1463,5	23	0,17	-0,96
Teneur en magnésium (kg ha^{-1})	Parcelle	185	3145	763	624,4	82	1,70	2,10
	Zone loameuse	185	1375	432	176	41	2,57	10,2
	Zone argileuse	740	3145	1539	609,6	40	0,68	-0,32

1- CEA

Parcelle : N = 1955 échantillons: ES (Erreur standard) pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,06 et 0,11.
Zone loameuse : N = 1420 échantillons: ES pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,07 et 1,13.
Zone argileuse : N = 524 échantillons: ES pour l'asymétrie et kurtose respectivement = 0,11 et 0,2.

2- Indicateurs de fertilité

Parcelle: N = 147 échantillons: ES pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,2 et 0,40.
Zone loameuse : N = 105: ES pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,24 et 0,47.
Zone argileuse : N = 44: ES pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,36 et 0,70.

4.1.4 Variabilité spatiale de la topographie (modèle numérique de terrain)

Au total, 2923 points d'échantillonnage ont été retenus pour l'élaboration du MNÉ. Ces données ont été recueillies à l'aide d'un DGPS en mode bi-fréquentiel. La valeur moyenne des données d'élévation de la parcelle expérimentale est de 34 m. Le MNÉ (figure 4.9a) indique une dénivellation, d'ouest en est d'environ 5 m, sur l'ensemble de la longueur du champ. En fait, l'extrémité ouest caractérise la zone d'élévation maximale alors que, l'extrémité est montre les valeurs les plus faibles. Le CV de 2,5 % indique une faible variabilité spatiale pour ce descripteur. L'observation visuelle du MNÉ démontre une variabilité plus importante, variation de 3,5 m ainsi qu'un gradient plus constant, dans la partie est, sur environ 350 m. Par contre, l'autre partie du champ présente des écarts d'élévation plus faibles (1,5 m) et une organisation spatiale moins bien définie.

La comparaison des distributions de l'élévation du MNÉ, à partir des boîtes à moustaches de Tukey (figure 4.9b), selon les groupes 1 et 2 permet d'observer que l'écart interquartile est plus étalé dans la zone argileuse (32 m à 33 m) que dans la zone loameuse (33,9 m à 34,2 m). Il est possible de visualiser une différence d'élévation entre les deux zones (médiane approximative de 32,5 m pour la zone argileuse et de 34 m pour la zone loameuse). Contrairement aux deux groupes, la médiane de la distribution de l'ensemble des données n'est plus centrée dans la boîte (environ 34 m). Pour l'ensemble des cas, les moustaches ne s'étendent pas jusqu'aux valeurs minimales et maximales, il y a donc présences de valeurs atypiques.

Suite à la réalisation du MNÉ, il a été possible de dériver d'autres paramètres que l'on qualifie d'attributs primaires, telle la pente et d'attributs secondaires tel l'indice d'hydratation superficielle. De plus, la transformation d'une photographie aérienne, en format matriciel en fonction des différents tons de gris, a permis d'ajouter un descripteur supplémentaire (tonalité de gris) au MNT. La pente, l'indice d'hydratation superficielle et la tonalité de gris peuvent être considérés comme des descripteurs caractérisant indirectement l'écoulement hydrique superficiel et l'humidité du sol. D'autres indices ont été dérivés, entre autres, l'orientation et la courbure. Comme il s'agit d'indicateurs dérivés ou n'ayant pas de valeurs métriques, ils n'ont pas été retenus pour l'analyse de description statistique.

D'après le calcul réalisé à partir de l'algorithme de Zevenbergen et Thorne (1987) la variation locale de la pente de la parcelle se situe entre 0 et 5 %. Selon la classification établie par le CEPPAC (1987), les pentes de ce champ varient de plates à très douces. L'indice d'hydratation superficielle varie de 5,7 (faiblement humide) à 18 (plus humide). Cet indice exprime le rapport entre l'accumulation des flux et la tangente de la pente. Voilà pourquoi, on remarque une certaine similarité lorsqu'on compare (figure 4.10a et b) l'organisation spatiale de la pente et de l'indice d'hydratation superficielle. Les zones, de plus forte pente, caractérisent celles de faible indice d'hydratation superficielle donc théoriquement mieux drainées. Les tons de gris de la photographie aérienne varient généralement en fonction de l'humidité et du drainage du sol. En effet, plus un sol est humide, plus il absorbe les rayons solaires et plus la teinte s'apparente au noir. Comme une comparaison visuelle entre les attributs devait être établie, une classification en cinq classes de couleurs a été définie. À la figure 4.10c, la classe en rouge représente les secteurs ayant un apport en eau plus faible alors que la classe en bleu correspond aux zones d'accumulation. Les pentes plus faibles, les indices d'hydratation plus élevés et les tonalités de gris plus foncées caractérisent les zones d'humidité plus importante. Pour l'ensemble des attributs, il est possible de constater une organisation spatiale longitudinale à l'intérieur du champ. Cette organisation peut être attribuable à d'anciens fossés de drainage (3) remblayés afin de créer une seule planche. La lecture des boîtes à moustaches (figures 4.10d, e et f) des différents attributs ne permet pas de distinguer une forte variabilité des descripteurs entre les deux zones.

Les paramètres hydrologiques dérivés du MNÉ, soit l'inondation des artéfacts, la direction de l'écoulement et la simulation des réseaux hydriques du BV sont présentés à la figure 4.11. La représentation de la simulation des réseaux hydriques permet d'observer, dans la zone argileuse, « l'exutoire » de deux canaux de drainage s'écoulant, d'ouest en est, vers l'aval du BV. Ces deux canaux pourraient expliquer la plus faible humidité de cette zone, puisque l'eau ruisselle vers le bas de la pente, à cause d'un plus fort gradient de pente. La texture argileuse de la zone favorise aussi le transport superficiel de l'eau en agissant comme une couche peu perméable. À noter aussi la présence d'un ruisseau à l'est du champ. Dans la partie loameuse, deux autres réseaux de drainage s'écoulent, d'est en ouest, dans le sens de la pente du champ. Par contre, ceux-ci dévient latéralement vers les fossés délimitant les frontières nord et sud du champ.

4.1.5 Variabilité spatiale du rendement des cultures

4.1.5.1 Variabilité spatiale du rendement en maïs-grain (1998)

En 1998, la valeur moyenne des rendements en maïs-grain à humidité contrôlée (15 %) se situe à 11 Mg ha^{-1} alors que l'humidité moyenne des grains est de 19,1 % (tableau 4.3). Les CV du rendement et de l'humidité des grains sont relativement faibles, respectivement 11,1% et 3,6 %. Les valeurs de CV du rendement de la zone argileuse et de la zone loameuse diminue. Cette diminution est attribuable à une plus grande homogénéité des données. Les résultats du coefficient d'asymétrie et de la kurtose démontrent que la distribution des données est décalée vers la droite et que la courbe est aplatie. Cependant, la subdivision a eu pour conséquence de réduire les valeurs extrêmes d'asymétrie et de kurtose. Les valeurs de l'erreur standard permettent de le confirmer.

Tableau 4.3: Statistiques descriptives du rendement en maïs-grain pour humidité contrôlée, 15,5 % et de l'humidité du grain issues de l'ensemble des données brutes corrigées (N=3696 échantillons)

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (%)	Asymétrie	Kurtose
Rendement à humidité contrôlée							
Parcelle	4,0	16,4	11,0	1,2	11,1	-1,23	3,48
Zone loameuse	4,0	16,4	11,2	1,2	10,2	-1,63	6,09
Zone argileuse	4,3	13,9	10,4	1,2	11,4	-0,90	1,93
Humidité du grain (%)							
Parcelle	10,0	22,0	19,1	0,7	3,6	-4,08	39,10
Zone loameuse	10,0	21,0	18,9	0,7	3,8	-4,90	43,20
Zone argileuse	16,0	22,0	19,3	0,5	2,6	-0,09	2,28

Parcelle: N = 3744 échantillons: ES (Erreur standard) pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,04 et 0,08.
Zone loameuse: N = 2528 échantillons: ES pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,05 et 0,10.
Zone argileuse: N = 1216 échantillons: ES pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,07 et 0,14.

L'analyse visuelle de la représentation cartographique (figure 4.12a) indique que les zones de faibles rendements caractérisent les extrémités du champ. À l'extrémité est, ces faibles rendements sont associés à la zone argileuse où le contenu en argile atteint jusqu'à 65 %. La valeur moyenne de rendement de la zone argileuse est effectivement plus faible que celle de la zone loameuse (10,4 Mg ha^{-1} *vs* 11,2 Mg ha^{-1}). De plus, l'humidité du grain, au moment de la récolte de la zone argileuse, est supérieure (19,3 %) à celle de la zone loameuse (18,9 %). L'humidité du grain caractérise la maturité de celui-ci, donc plus le contenu en eau d'un grain est élevé moins il est mature, ce qui correspond à un retard de croissance de la culture. À

l'extrémité ouest, la présence d'un couvert végétal (boisé) pourrait nuire à la croissance culturale. On constate que les différentes zones homogènes sont organisées dans le sens de la longueur du champ. Ces organisations spatiales longitudinales semblent associées aux pratiques culturales (culture en rangs espacés) et au modelage des planches. D'anciens fossés pourraient expliquer les faibles rendements de quelques zones longitudinales dans la partie centrale du champ. Ces anciens fossés de drainage caractérisent les zones d'humidité plus importantes qui sont mises en évidence sur les différentes représentations cartographiques des attributs du MNT (figure 4.10), de même que sur les cartes illustrant la variabilité spatiale de la CEA (figure 4.1).

4.1.5.2 Variabilité spatiale du rendement en soya (1999)

En 1999, la valeur moyenne des rendements en soya à humidité contrôlée (15 %) est de 3,4 Mg ha^{-1} alors que l'humidité moyenne des grains est de 13,7 % (tableau 4.4). Pour les données de l'ensemble de la parcelle, le CV de 15,3 % indique que la variabilité du rendement en soya de 1999 est plus élevée que celle du maïs en 1999 (CV = 11,1 %). De même la variabilité du rendement en soya est plus élevée (CV = 16,3 %) dans la zone argileuse que dans la zone loameuse (CV = 14,4 %).

La valeur moyenne du rendement en soya, suite au regroupement, s'établit à 3,5 Mg ha^{-1} pour la zone loameuse et, à 3,2 Mg ha^{-1}, pour la zone argileuse. La zone loameuse présente donc une productivité supérieure à la zone argileuse. De plus, celle-ci présente une teneur moyenne en humidité du grain au moment de la récolte plus élevée (14 %) que la zone loameuse (13,6 %) indiquant une maturité moindre de la récolte qui pourrait résulter d'un retard de croissance en début de saison dû à un réchauffement plus lent des sols argileux comparativement aux sols loameux. La zone argileuse représente à nouveau la zone de faible rendement. Les diagrammes en boîtes (figure 4.12d) permettent de comparer cette variabilité pour les deux différents groupes.

Tableau 4.4: Statistiques descriptives du rendement en soya pour humidité contrôlée et de l'humidité du grain issues de l'ensemble des données brutes corrigées.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV(%)	Asymétrie	Kurtose
Rendement à humidité contrôlée							
Parcelle	2,0	4,6	3,4	0,5	15,3	-0,27	-0,36
Zone loameuse	2,0	4,6	3,5	0,5	14,4	-0,35	-0,16
Zone argileuse	2,0	4,6	3,2	0,5	16,3	-0,05	-0,54
Humidité du grain (%)							
Parcelle	8,0	15,5	13,7	0,5	3,9	-2,11	16,34
Zone loameuse	8,0	15,0	13,6	0,5	3,4	-2,93	24,86
Zone argileuse	9,0	15,5	14,0	0,6	4,1	-2,85	19,46

Parcelle : N = 3059 échantillons: ES (Erreur standard) pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,05 et 0,09.
Zone loameuse: N = 2061 échantillons: ES pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,06 et 0,11.
Zone argileuse: N = 928 échantillons: ES pour l'asymétrie et kurtose respectivement 0,08 et 0,17.

Les conclusions tirées de l'analyse visuelle de la représentation cartographique du rendement en maïs-grain sont aussi appropriées pour expliquer l'organisation spatiale de la variabilité spatiale du rendement en soya (figure 4.12b).

4.1.5.3 Conditions climatiques 1998 et 1999

Les données climatiques, telles que la température moyenne et les précipitations moyennes, affectent le comportement des sols et la variabilité spatiale intra-parcellaire des rendements. Afin d'interpréter l'effet du climat sur les variations des rendements et sur le comportement des sols, les conditions climatiques des deux années de l'étude (1998 et 1999) sont présentées aux figures 4.21 et 4.22.

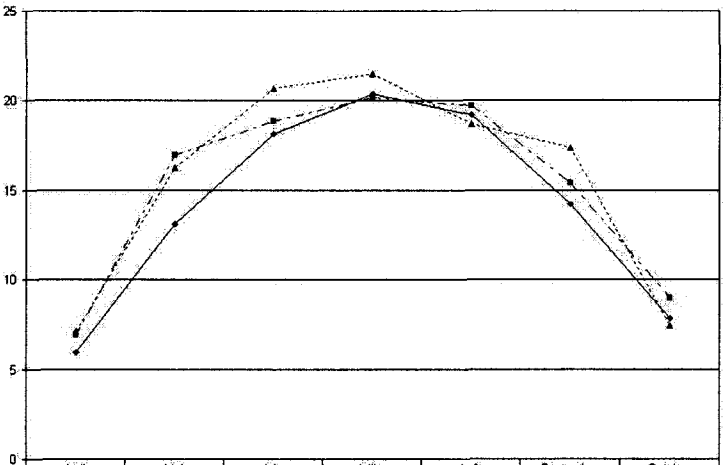
Pour l'ensemble de la saison de croissance (avril à octobre) de 1998 et de 1999, la température moyenne a été supérieure à la normale. En 1998, les écarts de température moyenne les plus importants sont observés au mois de mai (3,8°C), alors qu'en 1999, ils ont lieu au printemps (mai - juin) et en début d'automne (septembre).

Comme le rapporte Forand (2000), le début de la saison culturale de 1998 (avril) est caractérisée de faible précipitation par rapport à la moyenne des 19 dernières années. Selon Forand, la quantité d'eau disponibles dans le sol au printemps, a suffi pour le développement hâtif des plants. Les phases de germination et du développement des plantules le maïs-grain ont donc été favorisées par un climat idéal (chaleur et conditions sèches). Les intenses précipitations du mois de juillet ont par contre pu causer l'asphyxie des racines dans quelques

zones à faible capacité d'infiltration et de percolation (zone argileuse). Ce processus a sans doute été particulièrement actif dans les zones à saturation en eau plus élevée et d'allure longitudinale correspondant aux légères dépressions crées par les anciens fossés de drainage lors du modelage des planches. Un modelage de précision guidé à partir du MNÉ, favoriserait sans doute un meilleur drainage de surface et contribuerait ainsi à hausser la productivité de ces zones. Les précipitations furent en dessous de la normale pour les mois de septembre et d'octobre. Ces conditions sèches ont accéléré la maturation des grains et la qualité des récoltes a été excellente.

En 1999, un climat chaud et humide, températures élevées et des précipitations moyennes abondantes en avril et en juin, a sûrement favorisé la phase de germination et du développement des plantules du soya. Les mois de juillet et août ont été déficitaires en pluie par rapport aux précipitations moyennes, cependant l'emmagasinement de l'eau, dans la nappe durant les fortes pluies, a permis de réduire les risques de sécheresse.

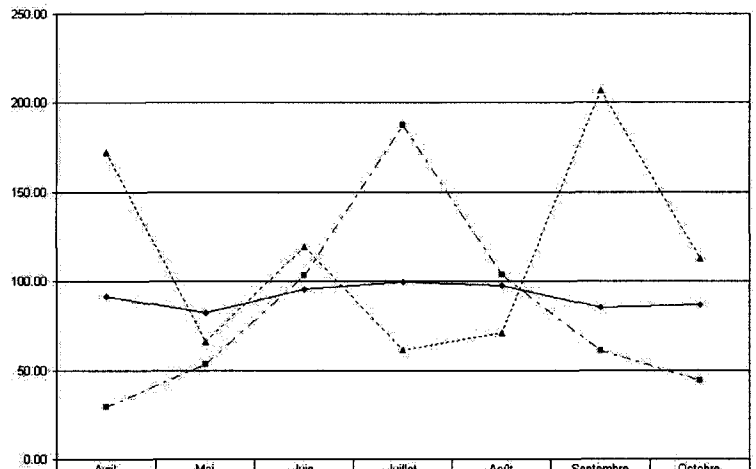
Bien que les conditions soient différentes de la moyenne, les conditions climatiques observées, durant ces deux années, n'étaient pas extrêmes (sécheresse et inondation). Ainsi sous les conditions climatiques prévalant en 1998 et 1999, la zone argileuse affiche une productivité agricole plus faible que dans la zone loameuse. Si cette tendance se maintient sur plusieurs années, il conviendrait d'établir des objectifs de rendement différents pour ces deux parties de champ et d'ajuster la fertilisation minérale (particulièrement l'azote) de façon à favoriser le développement optimal des cultures selon leurs potentiels et leurs réponses spécifiques à la fertilisation.



	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Moyenne	5.94	13.13	18.12	20.4	19.19	14.21	7.85
1998	6.9	16.97	18.83	20.16	19.69	15.39	9.02
1999	7.13	16.24	20.70	21.49	18.69	17.38	7.4

Source : Données obtenues de la station météorologique Sainte-Madelaine (# 7027517)

Figure 4.21: Moyennes mensuelles des températures pour 1998 et 1999 comparativement à la normale.



	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Moyenne	91.37	82.36	95.75	99.77	97.43	85.51	86.86
1998	29.4	53.4	102.90	187.40	103.80	61.10	44.00
1999	172.20	66.00	119.20	61.40	71.10	206.80	112.6

Source : Données obtenues de la station météorologique Sainte-Madelaine (# 7027517).

Figure 4.22: Moyennes mensuelles des précipitations pour 1998 et 1999 comparativement à la normale.

4.2 Analyses de relations entre les informations géographiques recueillies

4.2.1 Analyse en composantes principales (ACP)

Une ACP a été réalisée pour l'ensemble des données ainsi que pour chacun des groupements évalués lors de l'analyse descriptive. Diverses ACP ont été effectuées sur les indicateurs de fertilité du sol, comprenant 13 variables de même que sur les indicateurs de fertilité du sol jumelés aux données de CEA ainsi qu'aux différentes propriétés tirées du MNT, totalisant 19 variables. L'interprétation des différentes composantes conservées s'est faite à partir de la matrice de saturation. Seules les composantes principales retenues sont présentées dans les tableaux qui suivent, puisqu'elles expliquent à elles seules la majorité de la variance contenue dans les données. Le nombre de composantes interprétables a été déterminé à partir du critère de Kaiser-Guttman [Legendre et Legendre, 1998] qui veut que seules les valeurs propres (λ), supérieures à 1, soient prises en considération (figure 4.23). Le test du talus de Cattell y est aussi illustré [Cattell, 1966].

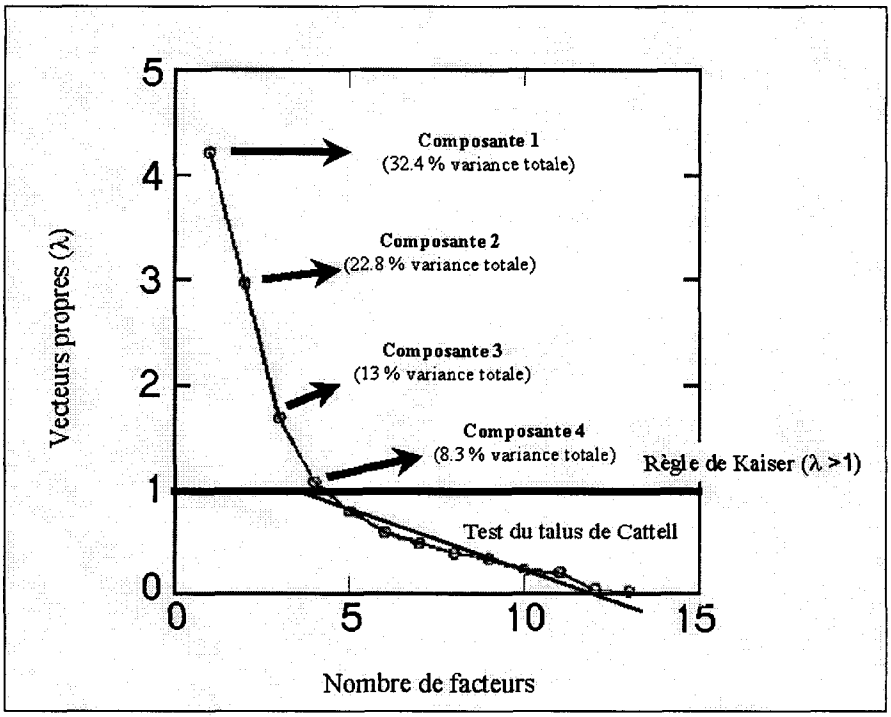


Figure 4.23: Graphiques illustrant le choix des composantes interprétables extraite de l'ACP à partir de la règle de Kaiser-Guttman et du test de talus de Cattell.

4.2.1.1 ACP effectuée à partir des indicateurs de fertilité du sol

Les descripteurs, expliquant les différentes composantes, ont été regroupés différemment d'un cas à l'autre. Toutefois, on peut sous une même composante regrouper des descripteurs en fonction de l'effet de texture, de réaction, de facteurs intrinsèques ou extrinsèques reliés à la composition d'un sol [Nolin et *al.*, 1989].

Parcelle

Les résultats de l'ACP effectuée sur les indicateurs de fertilité de l'ensemble de la parcelle (tableau 4.5) permettent d'expliquer 75,3 % de la variance totale expliquée. La première composante représentant 43,9 %, regroupe les différentes composantes texturales (argile, sable, et fraction limoneuse), le Ca, le Mg et le K. Cette composante reflète donc la variabilité reliée à la texture et à la fertilité intrinsèque du sol. La seconde composante, caractérisant 23,2 % de la variance d'origine, rassemble le pH, l'Al et la MO. Cette composante traduit l'impact de la réaction (pH et Al) et de la composante organique du sol (MO). La troisième composante qui exprime 8,2 % peut être associée la gestion (teneur en phosphore) et au travail du sol (épaisseur de Ap).

Tableau 4.5: Matrice des saturations pour les trois premières composantes calculées à partir des propriétés physico-chimiques des échantillons de sols de la parcelle.

Propriétés	CP 1	CP 2	CP 3
Contenu en argile	**0,933**	-0,155	-0,019
Teneur en magnésium	**0,915**	0,127	0,075
Contenu en sable	**-0,915**	0,188	0,064
Teneur en calcium	**0,845**	0,341	0,209
Teneur en potassium	**0,799**	-0,269	0,205
Fraction limoneuse fine	**0,778**	-0,312	-0,222
Fraction limoneuse moyenne	**-0,618**	0,129	-0,040
pH_{smp}	0,318	**0,880**	0,252
pH_{eau}	0,471	**0,787**	0,261
Teneur en matière organique	0,002	**-0,760**	0,266
Teneur en aluminium	0,389	**-0,738**	0,229
Teneur en phosphore	-0,394	-0,334	**0,630**
Épaisseur de l'horizon Ap	-0,444	0,097	**0,517**
Valeur propre (λ)	**5,7**	**3,0**	**1,1**
Variance totale expliquée (%)	**43,9**	**23,2**	**8,2**
Variance cumulée (%)	**43,9**	**67,1**	**75,3**
Facteur	**Texture**	**Réaction**	**Gestion**

Zone loameuse

La variance totale, expliquée par les 4 premières composantes issues de la zone loameuse, est de 76 %. Les résultats démontrent (tableau 4.6) que le pH_{eau}, le pH_{smp} (saturation négative) et l'Al, traduisent l'effet de la réaction du sol alors que la MO, le P et le K sont liés à l'effet de la gestion du sol. Ces descripteurs représentent la première composante de la matrice de saturation calculée à partir des données de la zone loameuse. Celle-ci explique 32,4 % de la variation du jeu de données. La seconde composante représentant 22,8 % de la variance originale, rassemble les différentes composantes de la texture (sable, argile, fractions limoneuses) ainsi que la teneur en Ca et Mg échangeable. On peut donc la désigner comme la composante décrivant la fertilité inhérente des sols loameux. La troisième et la quatrième composante (13 % et 8,3 %) sont décrites par un nombre limité de variables partiellement expliquées par les deux premières composantes extraites et, plus spécifiquement, par la fraction limoneuse moyenne et l'épaisseur de l'horizon Ap. Cette dernière permet d'associer la composante 4 à l'effet de travail du sol (labour et modelage des planches).

Tableau 4.6: Matrice des saturations pour les quatre premières composantes calculées à partir des propriétés physico-chimiques des échantillons de sols de la zone loameuse.

Propriétés	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
pH_{smp}	**-0,829**	0,431	0,156	0,009
Teneur en matière organique	**0,770**	0,140	0,198	0,151
Teneur en aluminium	**0,766**	-0,038	0,315	-0,066
pH_{eau}	**-0,741**	0,542	0,217	0,013
Contenu en argile	0,602	**0,627**	-0,035	-0,048
Contenu en sable	-0,585	**0,671**	0,381	-0,132
Fraction limoneuse fine	**0,568**	0,419	-0,463	-0,169
Teneur en potassium	**0,562**	0,195	0,552	-0,048
Teneur en phosphore	**0,542**	-0,251	0,513	0,088
Teneur en magnésium	-0,057	**0,820**	0,308	0,062
Teneur en calcium	-0,378	**0,741**	0,332	-0,096
Fraction limoneuse moyenne	0,039	0,319	**-0,527**	0,496
Épaisseur de l'horizon Ap	-0,088	-0,153	0,249	**0,855**
Valeur propre (λ)	**4,2**	**3,0**	**1,7**	**1,1**
Variance totale expliquée (%)	**32,4**	**22,8**	**13,0**	**8,3**
Variance cumulée (%)	**32,4**	**55,2**	**68,2**	**76,5**
Facteur	**Réaction**	**Texture**	**Gestion**	**Travail du sol**

Zone argileuse

Les résultats de l'ACP (tableau 4.7) effectuée sur les propriétés physico-chimiques des échantillons de sol de la zone argileuse sont comparables à ceux présentés précédemment quoique les descripteurs permettent de mieux faire ressortir les facteurs-sols. En effet, la première composante, qui représente 40 % de la variance, présentent des saturations positives élevées de pH_{eau}, pH_{smp}, P, Ca et Mg et négatives pour la MO et l'Al. La deuxième composante (variance 19,7 %) définit nettement l'effet de texture avec des saturations élevées en sable et en argile (négative) ainsi que pour la fraction limoneuse fine (négative) et moyenne. Quant à l'épaisseur de l'horizon Ap et à la teneur en K, elles sont toutes deux liées à la troisième composante qui représente 12 % de la variance totale. Aucune propriété ne permet de caractériser spécifiquement la quatrième composante (8 % de la variance). Les saturations les plus élevées, pour cette composante, ont été observées pour la teneur en P et l'épaisseur de Ap, lesquelles contribuent déjà à l'explication des autres composantes où elles présentent des saturations plus significatives. Il est à noter que la valeur propre λ est légèrement supérieure au critère de Kaiser-Guttman, ce qui pourrait expliquer la faible contribution de cette composante.

Tableau 4.7: Matrice des saturations pour les quatre premières composantes calculées à partir des propriétés physico-chimiques des échantillons de sols de la zone argileuse

Propriétés	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
pH_{smp}	**0,883**	0,286	0,225	0,013
Teneur en matière organique	**-0,874**	-0,005	0,225	0,113
pH_{eau}	**0,866**	0,316	0,267	-0,040
Teneur en magnésium	**0,847**	0,052	-0,367	-0,090
Teneur en calcium	**0,828**	0,312	0,080	-0,164
Teneur en aluminium	**-0,735**	0,080	-0,376	0,114
Teneur en phosphore	**0,602**	0,151	-0,139	0,569
Contenu en argile	0,554	**-0,732**	-0,002	-0,010
Contenu en sable	-0,524	**0,744**	-0,057	-0,004
Fraction limoneuse fine	0,016	**-0,792**	0,071	0,143
Fraction limoneuse moyenne	-0,204	**0,560**	0,399	-0,292
Épaisseur de l'horizon Ap	-0,071	0,061	**0,758**	0,592
Teneur en potassium	0,131	0,468	**-0,585**	0,441
Valeur propre (λ)	**5,2**	**2,6**	**1,6**	**1,0**
Variance totale expliquée (%)	**40,4**	**19,7**	**12,0**	**8,0**
Variance cumulée (%)	**40,4**	**60,1**	**72,1**	**80,1**
Facteur	**Réaction**	**Texture**	**Gestion 1**	**Gestion 2**

4.2.1.2 ACP effectuée à partir des indicateurs de fertilité du sol, de la CEA et des propriétés du MNT

D'autres ACP ont été effectuées à partir des indicateurs de fertilité du sol jumelés à la CEA ainsi qu'avec les descripteurs métriques extraits du MNT. Encore une fois les séries de données ont été analysées pour l'ensemble de la parcelle et pour chacun des groupements de sols.

Parcelle

Les quatre composantes retenues, selon le critère de Kaiser-Guttman (tableau 4.8), permettent d'expliquer 75,8 % de la variance d'origine. Il est possible de constater une grande similarité dans le regroupement des variables sous les différentes composantes. En effet, la première composante rassemble les différents descripteurs caractérisant la texture (argile, sable, les deux formes de fraction limoneuse et la CEA), les éléments nutritifs (Ca et Mg), de même que le K. L'élévation se retrouve aussi sous cette composante. Cette composante caractérise 45,1 % de la variance totale expliquée.

La deuxième composante représentant 16,7 % de la variance totale, traduit l'effet de réaction du sol (pH et Al). La teneur en MO se retrouve aussi sous cette composante. L'ajout de nouvelles variables à l'ACP a eu pour effet d'augmenter le nombre de composantes.

Pour l'ACP sur la parcelle, une nouvelle composante caractérisant l'effet de drainage du sol représente 8,2 % de la variance expliquée. Cette composante (3) regroupe l'indice d'hydratation superficielle (saturation positive), la pente et la tonalité de gris (saturation négative).

La quatrième composante est de nouveau caractérisée par la teneur en P (aménagement et gestion du sol) et l'épaisseur de l'horizon Ap (travail du sol). Cette composante ne représente que 5,8 % de la variance totale expliquée. Une valeur propre (λ) de 1,103 peut expliquer la faible contribution de cette composante.

Tableau 4.8: Matrice des saturations pour les quatre premières CP calculées à partir des propriétés physico-chimiques des échantillons de sols, de la CEA et des propriétés du MNT de la parcelle.

Propriétés	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
CEA en profondeur	**0,961**	-0,091	0,079	-0,049
CEA en surface	**0,937**	0,044	0,139	0,078
Teneur en magnésium	**0,929**	0,095	0,071	0,081
Contenu en argile	**0,923**	-0,182	-0,013	-0,050
Élévation	**-0,908**	0,027	-0,008	-0,037
Contenu en sable	**-0,900**	0,220	-0,031	0,106
Teneur en calcium	**0,840**	0,307	0,116	0,182
Teneur en potassium	**0,803**	-0,285	-0,006	0,217
Fraction limoneuse fine	**0,743**	0,339	0,024	-0256
Fraction limoneuse moyenne	**-0,612**	0,134	0,108	-0,062
pH_{smp}	0,330	**0,854**	0,189	0,225
pH_{eau}	0,479	**0,755**	0,190	0,224
Teneur en aluminium	0,360	**-0,754**	0,020	0,239
Teneur en matière organique	-0,025	**-0,752**	-0,075	0,238
Indice d'hydratation superficielle	-0,228	-0,058	**0,769**	0,198
Pente	0,499	0,235	**-0,651**	0,133
Tonalité de gris	0,164	0,413	**-0,601**	-0,002
Teneur en phosphore	-0,391	-0,286	-0,207	**0,670**
Épaisseur de l'horizon Ap	-0,420	0,113	-0,040	**0,451**
Valeur propre (λ)	**8,559**	**3,169**	**1,555**	**1,103**
Variance totale expliquée (%)	**45,1**	**16,7**	**8,2**	**5,8**
Variance cumulée (%)	**45,1**	**61,8**	**70**	**75,8**
Facteur	**Texture**	**Réaction**	**Drainage**	**Gestion**

Zone loameuse

Pour la zone loameuse, le pourcentage de la variance expliquée par les composantes 1, 2, 3, 4, et 5 est respectivement de 23,7, 22,5, 10,4, 8,8 et 5,9 % (tableau 4.9). La première composante est associée, à la fois, à la réaction, aux éléments de fertilité et à la CEA du sol. La deuxième composante représente les capacités d'échange et de fixation du sol puisqu'elle regroupe les descripteurs de la texture, le contenu en MO et la teneur en Al extrait au Mehlich-III qui est un indicateur de la capacité du phosphore.

Les propriétés du MNT caractérisent les troisième et quatrième composantes. La troisième composante est directement associée au comportement érosif du sol, attribuable à la pente et à la perte des fractions limoneuses fines, alors que la quatrième composante est liée à l'effet de drainage puisque les deux principales variables, la représentant, sont l'indice d'hydratation superficielle et la tonalité de gris. Ces deux indicateurs nous permettent d'obtenir de l'information sur le comportement hydrique de la partie superficielle du sol. La dernière composante est composée de la variable épaisseur de l'horizon Ap que l'on peut relier à l'effet de travail du sol.

Tableau 4.9: Matrice des saturations pour les cinq premières CP calculées à partir des propriétés physico-chimiques des échantillons de sols, de la CEA et des propriétés du MNT de la zone loameuse.

Propriétés	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5
pH_{eau}	**0,828**	-0,392	0,119	0,107	0,015
Teneur en calcium	**0,793**	-0,018	0,308	0,073	0,153
pH_{smp}	**0,771**	-0,516	0,025	0,134	0,023
Teneur en magnésium	**0,747**	0,349	0,150	0,220	0,038
CEA en surface	**0,732**	0,370	-0,074	0,206	-0,066
CEA en profondeur	**0,719**	0,441	-0,108	-0,140	-0,178
Élévation	**-0,524**	-0,100	-0,311	-0,096	0,084
Contenu en sable	-0,287	**-0,834**	0,263	0,287	0,076
Contenu en argile	0,289	**0,831**	0,095	-0,157	0,006
Teneur en matière organique	-0,250	**0,736**	0,223	0,023	-0,167
Fraction limoneuse moyenne	0,050	**0,680**	-0,288	-0,349	0,220
Teneur en aluminium	-0,398	**0,648**	0,264	0,167	0,070
Teneur en potassium	-0,117	**0,563**	0,428	0,335	0,138
Pente	0,038	-0,132	**0,738**	-0,435	-0,045
Fraction limoneuse fine	0,184	0,178	**-0,524**	-0,250	-0,340
Indice d'hydratation superficielle	0,124	0,138	-0,369	**0,671**	0,261
Tonalité de gris	0,253	-0,232	0,326	**-0,542**	0,126
Épaisseur de l'horizon Ap	-0,027	-0,114	0,132	0,255	**-0,856**
Teneur en phosphore	**-0,456**	0,348	0,425	0,293	-0,065
Valeur propre (λ)	**4,5**	**4,3**	**2,0**	**1,7**	**1,1**
Variance totale expliquée (%)	**23,7**	**22,5**	**10,4**	**8,8**	**5,9**
Variance cumulée (%)	**23,7**	**46,2**	**56,6**	**65,2**	**71,1**
Facteur	**Réaction**	**Texture**	**Pente**	**Drainage**	**Travail du sol**

Zone argileuse

À l'examen des résultats obtenus de l'ACP effectuée sur les sols argileux (tableau 4.10), on constate que la première composante exprime une grande partie, soit 37 %, de la variance totale expliquée qui se chiffre à 77,6 % pour l'ensemble des 5 composantes retenues pour l'interprétation. Les facteurs de réaction (pH et Al), les éléments nutritifs (Ca et Mg), la CEA (surface et profondeur), le P et la teneur en MO caractérisent cette composante. Le deuxième facteur regroupe l'argile, le sable et les deux fractions limoneuses et marque l'effet de texture des sols. La troisième composante regroupe l'élévation et l'épaisseur de l'horizon Ap, toutes deux présentent des saturations négatives.

Tout comme pour le cas précédent, l'indice d'hydratation superficielle et la tonalité de gris représentent la quatrième composante. Pour la dernière composante, aucune variable ne fait vraiment ressortir le facteur sol l'influençant, seuls la teneur en phosphore et l'épaisseur de l'horizon Ap présentent des saturations plus importantes mais celles-ci contribuent déjà à l'explication de la première et de la troisième composante.

Tableau 4.10: Matrice des saturations pour les cinq premières CP calculées à partir des propriétés physico-chimiques des échantillons de sols, de la CEA et des propriétés du MNT de la zone argileuse.

Propriétés	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5
Teneur en matière organique	**-0,884**	-0,017	-0,068	-0,097	0,078
Teneur en magnésium	**0,883**	0,102	0,210	0,154	-0,034
pH_{smp}	**0,837**	0,189	-0,441	0,143	0,032
CEA en surface	**0,814**	0,258	0,243	0,215	0,000
pH_{eau}	**0,786**	0,211	-0,486	0,193	-0,023
Teneur en calcium	**0,767**	0,232	-0,337	0,241	-0,142
Teneur en aluminium	**-0,697**	0,210	0,429	0,178	0,155
Pente	**0,696**	-0,114	0,033	-0,525	-0,250
CEA en profondeur	**0,650**	-0,026	0,482	0,223	-0,030
Teneur en phosphore	**0,589**	0,166	-0,047	-0,040	0,589
Contenu en argile	0,533	**-0,725**	0,084	0,169	0,048
Élévation	-0,517	-0,350	**-0,539**	0,293	0,005
Contenu en sable	-0,486	**0,774**	0,004	-0,086	-0,033
Fraction limoneuse fine	-0,022	**-0,757**	0,097	0,029	0,200
Teneur en potassium	0,233	**0,529**	0,354	-0,356	0,347
Épaisseur de l'horizon Ap	-0,159	-0,057	**-0,654**	-0,105	0,514
Tonalité de gris	0,452	-0,064	-0,089	**-0,651**	0,227
Indice d'hydratation superficielle	-0,235	0,428	0,064	**0,608**	0,266
Fraction limoneuse moyenne	-0,227	**0,470**	-0,429	-0,185	-0,346
Valeur propre (λ)	**7,0**	**2,8**	**2,1**	**1,6**	**1,1**
Variance totale expliquée (%)	**37,0**	**14,8**	**11,2**	**8,6**	**6,0**
Variance cumulée (%)	**37,0**	**51,8**	**63,0**	**71,6**	**77,6**
Facteur	**Réaction - fertilité**	**Texture**	**Travail du sol**	**Drainage**	**Gestion**

4.3 Relation entre le rendement des cultures, les indicateurs de qualité du sol et les différents attributs du MNT

4.3.1 Corrélations de Spearman

Le coefficient de corrélation non-paramétrique de Spearman (analyse sous forme de rang) a été retenu puisque la majorité des descripteurs étudiés ne répondent pas aux critères de normalité et ce paramètre n'est pas uniquement limité aux relations de type linéaire comme le coefficient de corrélation de Pearson. Par contre, la relation doit être de type monotone. L'examen des coefficients de corrélation de la couche de surface présentés dans les tableaux 4.11 à 4.13, permet de quantifier le degré d'association entre les variables étudiées.

Parcelle

Les relations entre les différents indicateurs du rendement et les descripteurs du milieu ne sont pas très élevées ($r_s < |0,58|$). Les propriétés présentant les corrélations les plus élevées entre le rendement en maïs-grain et les descripteurs du site sont l'élévation, la CEA, la texture, le potassium et le magnésium ($r_s \geq |0,45|$). En fait, les coefficients de corrélation pour le rendement en soya et les descripteurs du milieu sont plus faibles qu'avec le rendement en maïs mais ce sont sensiblement les mêmes qui présentent les coefficients les plus élevés. Forand (2000) associe l'absence de corrélation significative de 1998 à une saison de croissance exceptionnelle, tant au niveau de la distribution et de l'abondance des précipitations qu'aux conditions de températures moyennes. Les conditions climatiques de 1999 étant aussi favorables à la saison de croissance du soya pourrait aussi expliquer l'absence de corrélation significative d'où l'importance d'accumuler plus d'une année de données de récolte avant de tirer des conclusions définitives sur les relations entre le sol, la CEA, propriétés du MNT et le rendement des cultures.

La CEA, qu'elle soit mesurée en surface ou en profondeur, présente des coefficients de corrélation plus élevés avec les indicateurs de qualité des sols que les propriétés du MNT. On note une corrélation moyenne à élevée pour l'ensemble des indicateurs de fertilité du sol, à l'exception de l'épaisseur de l'horizon Ap, de la teneur en MO et de la teneur en aluminium.

C'est donc un bon indicateur pour guider l'échantillonnage intensif des sols et pour stratifier les parcelles en zones d'aménagement au comportement homogène.

Les relations entre les attributs du MNT et les autres paramètres sont pratiquement inexistantes. Fait exception, la pente qui est modérément corrélée certains descripteurs ($r_s \approx 0,3$ à $0,4$). Les résultats indiquent, que les données de rendement de 1998 et 1999 présentent peu de relations avec les attributs dérivés du MNT. Braum et *al.* (1999) ont obtenu des résultats similaires pour une culture de maïs, pour les années 1995 et 1997, pour un site situé au sud-ouest du Minnesota.

Tableau 4.11: Coefficient de corrélation de Spearman (r_s) qualifiant les relations entre les descripteurs mesurés sur l'ensemble des échantillons de la parcelle Viens (N = 147 échantillons).

	Maïs-grain		Soya		CEA		Propriétés du MNT			
Propriétés	Rend.	Hum.	Rend.	Hum.	30 cm	100 cm	Élévation	Pente	Indice	Tonalité
Maïs-grain - Rend.	1,00	-0,46	0,59	-0,40	-0,47	-0,47	0,56	-0,17	0,09	0,03
Maïs-grain - Hum.	-0,46	1,00	-0,26	0,40	0,27	0,28	-0,41	-0,05	0,01	-0,08
Soya - Rend.	0,59	-0,26	1,00	-0,40	-0,31	-0,38	0,37	-0,21	0,05	-0,06
Soya - Hum.	-0,40	0,40	-0,40	1,00	0,42	0,48	-0,53	0,01	-0,06	-0,06
CEA en surface (30 cm)	-0,47	0,27	-0,31	0,42	1,00	0,92	-0,65	0,22	-0,13	0,05
CEA en profondeur (100 cm)	-0,47	0,28	-0,38	0,48	0,92	1,00	-0,71	0,28	-0,21	0,11
Élévation	0,56	-0,41	0,37	-0,53	-0,65	-0,71	1,00	-0,42	0,25	-0,07
Pente	-0,17	-0,05	-0,21	0,01	0,22	0,28	-0,42	1,00	-0,63	0,33
Indice	0,09	0,01	0,05	-0,06	-0,13	-0,21	0,25	-0,63	1,00	-0,31
Tonalité	0,03	-0,08	-0,06	-0,06	0,05	0,11	-0,07	0,33	-0,31	1,00
Épaisseur de l'horizon Ap	0,37	-0,23	0,15	-0,23	-0,33	-0,34	0,33	-0,14	0,14	-0,06
Contenu en sable	0,48	-0,39	0,37	-0,48	-0,73	-0,78	0,58	-0,20	0,22	0,01
Fraction limoneuse moyenne	0,47	-0,28	0,29	-0,28	-0,42	-0,38	0,52	-0,38	0,27	-0,09
Fraction limoneuse fine	-0,45	0,39	-0,28	0,51	0,59	0,63	-0,48	0,13	-0,18	0,00
Contenu en argile	-0,46	0,31	-0,38	0,43	0,70	0,74	-0,57	0,27	-0,23	-0,02
pH_{eau}	-0,16	-0,19	-0,09	0,03	0,52	0,49	-0,44	0,27	-0,09	0,26
pH_{smp}	-0,08	-0,31	-0,07	-0,08	0,35	0,32	-0,28	0,21	-0,04	0,26
Teneur MO	0,08	0,07	-0,00	0,16	0,05	0,09	0,05	-0,11	0,02	-0,27
Teneur en phosphore	0,34	-0,15	0,15	-0,22	-0,51	-0,55	0,44	-0,22	0,24	-0,13
Teneur en potassium	-0,58	0,44	-0,42	0,42	0,56	0,54	-0,56	0,27	-0,14	-0,04
Teneur en magnésium	-0,51	0,21	-0,41	0,43	0,89	0,87	-0,68	0,31	-0,13	0,11
Teneur en calcium	-0,42	0,12	-0,23	0,33	0,75	0,73	-0,71	0,37	-0,25	0,18
Teneur en aluminium	-0,35	0,39	-0,30	0,31	0,27	0,33	-0,31	0,04	-0,03	-0,15
CP1 – fertilité – texture	-0,49	0,14	-0,29	0,33	0,80	0,78	-0,74	0,38	-0,22	0,21
CP2 – fertilité – réaction	-0,34	0,48	-0,29	0,38	0,25	0,28	-0,25	0,05	-0,07	-0,21
CP3 – fertilité – gestion	-0,42	0,39	-0,29	0,22	0,40	0,37	-0,38	0,26	-0,13	0,10
CP1 – globale – texture	-0,48	0,18	-0,32	0,41	0,82	0,85	-0,76	0,47	-0,34	0,22
CP2 – globale – réaction	0,12	-0,39	-0,35	-0,26	0,06	0,03	-0,04	0,23	-0,12	0,41
CP3 – globale – drainage	-0,09	0,02	0,11	0,13	0,22	0,13	-0,07	-0,59	0,72	-0,57
CP4 – globale – gestion	0,04	-0,11	-0,10	-0,08	0,02	-0,05	-0,07	0,03	0,21	-0,04

Zone loameuse

La subdivision en deux groupements a eu pour effet de diminuer la valeur des coefficients de corrélation obtenue particulièrement dans le cas de la zone loameuse (tableau 4.12). Ces résultats plus faibles sont attribuables à l'homogénéité créée suite au groupement et à l'effet de la nature des sols (pédologie) tant sur les propriétés physico-chimiques des sols que sur le rendement. L'étude du CV lors de l'analyse statistique descriptive confirme cette observation.

Les relations entre les différents indicateurs de fertilité et le rendement, tant pour la culture de maïs-grain que pour le soya, sont quasi inexistantes. Seuls l'indice d'hydratation superficiel et la teneur en Ca présentent des coefficients un peu plus élevés quoique relativement faibles ($r_s \approx 0,25$). Lorsqu'on compare les composantes principales retenues de l'analyse avec les indicateurs de fertilité et celles incluant la CEA et les propriétés du MNT, on constate que les coefficients de corrélation sont relativement faibles. La deuxième composante, issue du calcul des indicateurs de fertilité et la première et troisième composante, incluant la CEA, issue de la seconde analyse, se révèlent les plus élevées, avec des r_s respectifs de 0,17, 0,17 et 0,18 et ce, seulement pour le cas du maïs-grain.

En ce qui a trait aux résultats des coefficients obtenus pour exprimer la relation entre la CEA, les indicateurs de fertilité et les propriétés du MNT, ceux-ci sont modérés ($r_s < 0,4$), à l'exception de la teneur en Mg ainsi que pour les composantes 2 (fertilité) et 1 (globale) qui ont des valeurs supérieures à 0,60. Les deux composantes caractérisent respectivement l'effet de texture et regroupent les deux formes de CEA.

Encore une fois, les résultats des propriétés du MNT ne révèlent pas beaucoup de relations avec les différents descripteurs; elles sont pratiquement inexistantes. Lorsqu'on compare les différents facteurs de l'analyse en composantes principales, aucun lien n'est vraiment observable, à l'exception des composantes incluant ces propriétés.

Tableau 4.12: Coefficient de corrélation de Spearman (r_s) qualifiant les relations entre les descripteurs mesurés sur la zone loameuse de la parcelle Viens (N = 103 échantillons).

	Maïs-grain		Soya		CEA		Propriétés MNT			
Propriétés	Rend.	Hum,	Rend.	Hum.	30 cm	100 cm	Élévation	Pente	Indice	Tonalité
Maïs-grain - Rend.	1,00	-0,24	0,36	-0,09	0,18	0,19	0,03	0,14	-0,25	0,14
Maïs-grain - Hum.	-0,24	1,00	-0,05	0,22	-0,24	-0,27	0,06	-0,34	0,12	-0,13
Soya - Rend.	0,36	-0,05	1,00	-0,21	0,10	-0,01	-0,09	0,05	-0,20	0,02
Soya - Hum.	-0,09	0,22	-0,21	1,00	0,05	0,17	-0,21	-0,29	0,19	-0,14
CEA en surface (30 cm)	0,18	-0,24	0,10	0,05	1,00	0,78	-0,07	-0,16	-0,01	0,21
CEA en profondeur (100 cm)	0,19	-0,27	-0,01	0,17	0,78	1,00	-0,22	-0,04	0,08	0,06
Élévation	0,03	0,06	-0,09	-0,21	-0,06	-0,21	1,00	-0,21	0,02	0,03
Pente	0,14	-0,34	0,05	-0,29	-0,15	-0,02	-0,21	1,00	0,26	-0,59
Indice	-0,25	0,12	-0,20	0,19	0,19	0,03	0,02	-0,59	1,00	-0,31
Tonalité	0,14	-0,13	0,02	-0,14	0,01	0,11	0,02	0,26	-0,31	1,00
Épaisseur de l'horizon Ap	0,04	0,07	-0,13	0,04	0,05	0,01	-0,02	0,07	-0,00	-0,08
Contenu en sable	-0,08	-0,09	0,04	-0,19	-0,33	-0,46	-0,05	0,16	-0,10	0,13
Fraction limoneuse fine	0,13	0,02	0,05	0,09	0,11	0,28	0,17	-0,24	0,09	-0,11
Fraction limoneuse moyenne	0,01	0,18	0,03	0,29	0,16	0,21	0,10	-0,20	0,08	-0,08
Contenu en argile	0,08	-0,04	-0,07	0,12	0,31	0,41	0,01	-0,05	0,05	-0,16
pH_{eau}	0,16	-0,42	0,17	-0,11	0,43	0,43	-0,39	0,16	0,02	0,29
pH_{smp}	0,11	-0,43	0,14	-0,14	0,37	0,36	-0,35	0,11	0,07	0,25
Teneur MO	0,15	-0,05	-0,09	0,15	0,06	0,10	0,20	-0,02	-0,03	-0,32
Teneur en phosphore	0,02	0,25	-0,06	0,12	-0,30	-0,36	0,08	-0,16	0,16	-0,24
Teneur en potassium	-0,13	0,07	-0,11	0,05	-0,14	-0,20	0,15	-0,02	0,17	-0,20
Teneur en magnésium	0,09	-0,36	-0,10	0,08	0,70	0,67	-0,17	0,01	0,23	0,10
Teneur en calcium	0,21	-0,41	0,17	-0,00	0,42	0,41	-0,39	0,17	-0,07	0,23
Teneur en aluminium	-0,08	0,11	-0,21	0,08	-0,15	-0,09	0,10	-0,04	0,01	-0,17
CP1 – fertilité – réaction	-0,05	0,29	-0,13	0,23	-0,14	-0,09	0,23	-0,14	0,06	-0,27
CP2 – fertilité – texture	0,17	-0,31	0,06	0,12	0,61	0,67	-0,23	0,06	0,04	0,13
CP3 – fertilité – gestion	-0,10	-0,14	-0,09	-0,01	0,05	-0,10	-0,25	0,13	0,13	-0,05
CP4 – fertilité – travail du sol	0,10	0,068	-0,02	0,12	0,13	0,18	-0,04	-0,04	0,01	-0,09
CP1 – globale – réaction	0,17	-0,38	0,,13	0,31	0,68	0,71	-0,43	0,11	0,03	0,30
CP2 – globale – texture	0,04	0,13	-0,07	0,24	0,22	0,29	0,10	-0,18	0,14	-0,26
CP3 – globale – pente	0,08	-0,19	0,04	-0,21	-0,17	-0,16	0,24	0,63	-0,43	0,24
CP4 – globale – drainage	-0,18	0,03	-0,10	0,15	0,24	-0,03	-0,18	-0,37	0,70	-0,49
CP5 – globale – travail du sol	-0,13	-0,03	-0,03	-0,10	-0,15	-0,22	0,12	-0,06	0,19	0,15

Zone argileuse

Comparativement à la zone loameuse, la partie argileuse présente des coefficients de corrélation entre les variables plus élevées. L'élévation est le descripteur le plus fortement corrélé (r_s = 0,61) avec le rendement en soya. Cette forte relation est attribuable à une grande variation de la topographie, environ 4 mètres, à l'extrémité est de la parcelle expérimentale. Les indicateurs de fertilité ainsi que les composantes des deux ACP, présentent des r_s relativement faibles, et ce tant pour le rendement en maïs-grain qu'en soya.

L'attribut primaire du MNT le plus fortement corrélé avec la CEA est la pente avec un r_s = 0,45. Contrairement à la zone loameuse, la majorité des données issues de l'échantillon appartenant à la zone argileuse sont en relation avec la plupart des descripteurs, à l'exception de l'épaisseur de l'horizon Ap, des fractions limoneuses, de la teneur en K, en Al ainsi que l'indice d'hydratation superficielle et les tonalités de gris de la photographie aérienne. Cependant, les valeurs de la CEA, en profondeur, sont légèrement inférieures aux coefficients de corrélation obtenus à partir de la CEA de surface. Les facteurs de l'ACP les plus fortement corrélés sont ceux que l'on explique par l'effet de texture.

À partir des propriétés du MNT, il est possible d'établir une relation entre l'altitude et la teneur en potassium, relation négative, donc plus on diminue en altitude, plus on note une accumulation de potassium. Ceci concorde avec la théorie d'échange cationique puisque la zone de faible altitude est principalement composée d'argile et le potassium, élément chargé positivement, adhère à la surface. On observe aussi une relation négative entre la pente et la teneur en MO. L'accumulation de la MO est plus importante dans les zones dépressionnaires. Cette accumulation est liée à une plus faible activité microbienne due à une plus grande teneur en eau. Le processus érosif pourrait aussi être indirectement responsable de l'accumulation de la MO dans ces zones de dépression. Une relation positive, entre la pente et le magnésium, est aussi observée.

Les attributs primaires et secondaires présentent des relations spatiales entre eux. Cependant, certaines relations sont associées à l'utilisation d'un attribut pour en dériver un autre. Par exemple, on utilise la pente pour calculer l'indice d'hydratation superficielle. Pour d'autres, l'analyse visuelle avait permis, entre autre, d'établir une certaine corrélation entre l'indice d'hydratation, la pente et la tonalité de gris ; celle-ci se confirme avec des r_s

respectivement de 0,51 et 0,42. La CP 1 de l'ACP-fertilité, la CP 1, 3 et 4 de l'ACP-globale sont moyennement corrélées ($r_s > 0,5$) avec les propriétés du MNT.

Tableau 4.13: Coefficient de corrélation de Spearman (r_s) qualifiant les relations entre les descripteurs mesurés sur la zone argileuse de la parcelle Viens (N = 44 échantillons).

	Maïs-grain		Soya		CEA		Propriétés MNT			
Propriétés	Rend.	Hum.	Rend.	Hum.	30 cm	100 cm	Élévation	Pente	Indice	Tonalité
Maïs-grain - Rend.	1,00	0,15	0,75	-0,08	-0,38	-0,30	0,33	-0,19	0,29	-0,19
Maïs-grain - Hum.	0,15	1,00	0,03	-0,01	-0,21	-0,04	-0,42	-0,03	0,23	-0,11
Soya - Rend.	0,75	0,03	1,00	-0,16	-0,33	-0,47	0,1	-0,45	0,26	-0,30
Soya - Hum.	-0,08	-0,01	-0,16	1,00	-0,23	-0,24	-0,19	-0,01	-0,06	-0,01
CEA en surface (30 cm)	-0,38	-0,21	-0,33	-0,23	1,00	0,77	-0,44	0,45	-0,13	0,09
CEA en profondeur (100 cm)	-0,30	-0,04	-0,47	-0,24	0,77	1,00	-0,51	0,42	-0,09	0,19
Élévation	0,33	-0,42	0,61	-0,19	-0,44	-0,51	1,00	-0,58	-0,27	0,17
Pente	-0,19	-0,03	-0,45	-0,01	0,45	0,42	-0,58	1,00	0,51	-0,53
Indice	0,29	0,23	0,26	-0,06	-0,13	-0,09	-0,27	0,51	1,00	-0,42
Tonalité	-0,19	-0,11	-0,30	-0,01	0,09	0,19	0,17	-0,53	-0,42	1,00
Épaisseur de l'horizon Ap	0,32	-0,06	0,17	-0,11	-0,25	-0,20	0,25	-0,24	0,05	0,20
Contenu en sable	0,34	0,25	0,38	0,00	-0,51	-0,45	0,17	-0,42	-0,19	0,36
Fraction limoneuse fine	0,17	0,14	0,11	0,01	-0,16	-0,28	0,00	-0,06	-0,09	0,18
Fraction limoneuse moyenne	0,13	-0,24	0,09	0,16	-0,02	0,07	0,17	-0,02	-0,01	0,02
Contenu en argile	-0,42	-0,20	-0,39	-0,02	0,58	0,51	-0,23	0,36	0,16	-0,33
pH_{eau}	-0,30	-0,36	-0,31	-0,37	0,58	0,30	-0,10	0,37	0,23	-0,15
pH_{smp}	-0,30	-0,38	-0,33	-0,39	0,58	0,34	-0,13	0,42	0,29	-0,20
Teneur MO	0,46	0,26	0,51	0,10	-0,78	-0,58	0,44	-0,58	-0,24	0,33
Teneur en phosphore	-0,18	-0,09	-0,27	-0,06	0,49	0,37	-0,29	0,29	0,36	-0,04
Teneur en potassium	-0,36	0,30	-0,35	0,11	0,23	0,18	-0,53	0,14	0,22	-0,01
Teneur en magnésium	-0,39	-0,23	-0,43	-0,12	0,82	0,68	-0,37	0,49	0,18	-0,21
Teneur en calcium	-0,37	-0,42	-0,25	-0,38	0,72	0,41	-0,04	0,35	0,15	-0,18
Teneur en aluminium	0,12	0,42	0,29	0,15	-0,40	-0,22	0,11	-0,57	-0,34	0,47
CP1 – fertilité – réaction	-0,46	-0,42	-0,48	-0,22	0,76	0,51	-0,26	0,54	0,27	-0,33
CP2 – fertilité – texture	-0,21	0,07	-0,16	-0,28	0,11	-0,07	-0,11	-0,01	0,13	0,14
CP3 – fertilité – gestion 1	0,26	0,22	0,21	-0,26	-0,25	-0,31	0,47	-0,18	-0,17	0,05
CP4 – fertilité– gestion 2	0,09	0,07	-0,02	0,05	-0,18	-0,07	-0,04	-0,17	0,21	0,14
CP1 – globale – réaction – fertilité	-0,41	-0,30	-0,48	-0,21	0,85	0,66	-0,43	0,65	0,34	-0,35
CP2 – globale – texture	-0,22	0,225	-0,13	-0,25	0,15	0,01	-0,20	-0,14	0,06	0,26
CP3 – globale – travail du sol	0,30	0,30	-0,21	0,34	0,20	0,46	-0,57	0,26	0,13	-0,06
CP4 – globale – drainage	-0,21	-0,21	0,23	-0,21	0,25	0,18	0,38	-0,50	-0,64	0,53
CP5 – globale - gestion	0,01	0,01	-0,03	-0,02	-0,11	0,03	0,03	-0,31	0,22	0,28

4.3.2 Régressions linéaires multiples

Parcelle

Les résultats de l'analyse de régression, présentés au tableau 4.14, permettent de constater que la CP1, CP2 et CP3 de l'ACP-fertilité permettent d'expliquer 48 % de la variabilité du rendement en maïs-grain et 30 % de la variabilité du rendement en soya. Pour l'ACP-globale, seule la CP1 est retenue ($P < 0,05$) et permet d'expliquer 48 % de la variabilité du rendement en maïs-grain et 30 % du rendement en soya. Des composantes différentes permettent, dans des proportions plus faibles (24 à 31 %), d'expliquer la variabilité de l'humidité du grain de la culture de maïs et de soya. La texture et la fertilité du sol sont donc les deux principaux facteurs influençant le comportement de la croissance de la culture à l'intérieur du champ.

À noter que l'élévation, appartenant à la première composante de l'ACP-globale, influence une partie de la variabilité de la réponse de la culture. Le MNÉ permet d'établir un modèle de prédiction du rendement des cultures. Par contre, aucune relation n'a pu être établie entre la variabilité du rendement et l'humidité du grain des cultures de la parcelle et les trois attributs retenus, soit l'indice d'hydratation superficielle, la pente et la tonalité de gris.

Tableau 4.14: Régressions linéaires multiples mettant en relation le rendement et l'humidité du grain du maïs-grain et du soya avec les différentes composantes principales pour la parcelle.

	Maïs-grain		Soya	
	Coefficient standardisé	P	Coefficient standardisé	P
ACP dérivée des indicateurs de fertilité				
Rendement				
CP1 – texture	-0,532	**0,000**	-0,329	**0,000**
CP2 – réaction	-0,298	**0,000**	-0,265	**0,000**
CP3 – gestion	-0,149	**0,032**	-0,218	**0,007**
	R multiple = 0,69	R^2multiple = 0,48	R multiple = 0,55	R^2multiple = 0,30
Humidité du grain				
CP1 – texture	0,109	0,179	0,309	**0,000**
CP2 – réaction	0,433	**0,000**	0,373	**0,000**
CP3 – gestion	0,208	**0,011**	0,008	0,925
	R multiple = 0,53	R^2multiple = 0,28	R multiple = 0,49	R^2multiple = 0,24
ACP dérivée des indicateurs de fertilité, de la CEA et du MNT				
Rendement				
CP1 – texture	-0,682	**0,000**	-0,517	**0,000**
CP2 – réaction	0,092	0,131	0,086	0,227
CP3 – drainage	-0,077	0,203	0,069	0,331
CP4 – gestion	0,054	0,373	-0,074	0,300
	R multiple = 0,70	R^2multiple = 0,48	R multiple = 0,53	R^2multiple = 0,29
Humidité du grain				
CP1 – texture	0,394	**0,000**	0,462	**0,000**
CP2 – réaction	-0,371	**0,000**	-0,285	**0,000**
CP3 – drainage	0,065	0,355	0,108	0,123
CP4 – gestion	-0,072	0,304	-0,076	0,280
	R multiple = 0,55	R^2multiple = 0,30	R multiple = 0,56	R^2multiple = 0,31

Zone loameuse

Pour la zone loameuse, les différentes composantes principales ne permettent pas d'établir de relation aussi nette que lorsqu'on a étudié le comportement du rendement et de l'humidité du grain de la parcelle entière. Ceci pourrait être attribuable à un groupement homogène de l'ensemble des propriétés de l'ACP-fertilité et de l'ensemble des descripteurs de l'ACP-globale. Il s'agit donc d'une zone de gestion spécifique.

Comme on peut le constater au tableau 4.15, pour le rendement en maïs, de même que pour le rendement en soya, aucune CP n'est statistiquement significative ($P < 0,05$), à l'exception de la composante drainage (CP4) qui permet d'expliquer 9 % de la variabilité du rendement en maïs-grain .

La première, la deuxième et la troisième composante de l'ACP-globale, avec des coefficients standardisés respectifs de -0,303, 0,161 et -0,192, permettent d'étudier le comportement de la variabilité de l'humidité du maïs-grain, à l'intérieur de la zone loameuse. Ce sont principalement la CEA et les propriétés du MNT qui déterminent l'humidité du grain du maïs (16 %). La texture (CP2) est la seule composante statistiquement significative ($P = 0,009$) pour l'humidité du grain du soya. Celle-ci permet de modéliser une portion (11 %) de la variabilité de l'humidité du grain du soya.

Les indices, permettant de modéliser la teneur en eau de la partie superficielle du sol, constituent des paramètres de prédiction intéressants pour expliquer une partie de la variabilité du rendement et de l'humidité du grain. Pour ce qui est de la culture de soya, il semble que la pente, caractérisant le transport de sédiments, soit l'indice le plus utile.

Tableau 4.15: Régressions linéaires multiples mettant en relation le rendement et l'humidité du grain du maïs-grain et du soya avec les différentes composantes principales pour la zone loameuse.

	Maïs-grain		Soya	
	Coefficient standardisé	P	Coefficient standardisé	P
ACP dérivée des indicateurs de fertilité				
Rendement				
CP1 – réaction	-0,04	0,685	-0,152	0,125
CP2 – texture	0,12	0,240	0,072	0,465
CP3 – gestion	-0,03	0,755	-0,144	0,146
CP4 – travail du sol	0,09	0,395	0,001	0,991
	R multiple = 0,15	R^2multiple = 0,02	R multiple = 0,22	R^2multiple = 0,05
Humidité du grain				
CP1 – réaction	0,281	**0,003**	0,206	**0,038**
CP2 – texture	-0,218	**0,022**	0,686	0,494
CP3 – gestion	-0,128	0,174	-1,021	0,310
CP4 – travail du sol	0,024	0,802	0,959	0,340
	R multiple = 0,38	R^2multiple = 0,14	R multiple = 0,26	R^2multiple = 0,07
ACP dérivée des indicateurs de fertilité, de la CEA et du MNT				
Rendement				
CP1 – réaction	0,129	0,185	0,108	0,276
CP2 – texture	0,011	0,907	-0,113	0,256
CP3 – pente	0,087	0,370	-0,095	0,336
CP4 – drainage	-0,213	**0,030**	-0,149	0,134
CP5 – travail du sol	-0,139	0,155	-0,002	0,983
	R multiple = 0,30	R^2multiple = 0,09	R multiple = 0,24	R^2multiple = 0,06
Humidité				
CP1 – réaction	-0,303	**0,002**	0,007	0,939
CP2 – texture	0,161	0,087	0,254	**0,009**
CP3 – pente	-0,192	**0,042**	-0,157	0,104
CP4 – drainage	0,078	0,405	0,099	0,304
CP5 – travail du sol	0,017	0,857	-0,107	0,268
	R multiple = 0,40	R^2multiple = 0,16	R multiple = 0,33	R^2multiple = 0,11

Zone argileuse

Les résultats de l'ensemble des modèles de prédictions développés, à partir des composantes des deux formes d'ACP, pour la zone argileuse, sont présentés au tableau 4.16. Le comportement de la zone argileuse semble plus hétérogène. Cette variabilité peut être attribuée à un moins grand nombre d'échantillons (N = 44) à l'intérieur de ce groupe.

Les coefficients de détermination, pour les différents modèles de régression générés, sont plus élevés et, pour chacun des modèles, un plus grand nombre de composantes est statistiquement significatif ($P < 0,05$). Le pourcentage de variabilité expliqué varie entre 26 à 40 %, pour le rendement, et de 17 à 33 % pour l'humidité des grains. La variabilité du rendement (excepté pour l'ACP-globale) et de l'humidité des grains, pour la culture de soya, est moins bien expliquée par les différentes composantes que pour la culture de maïs-grain.

Pour l'ACP-fertilité, la réaction, les éléments nutritifs (CP1) et le travail du sol (CP3) expliquent, respectivement 30 % et 26 % de la variabilité du rendement en maïs-grain et en soya. Quant à la variabilité de l'humidité des grains pour le maïs, elle est caractérisée par la réaction et le travail du sol (modelage des planches) alors qu'aucune composante n'est statistiquement significative pour l'humidité du grain du soya.

Pour l'ACP-globale, on peut constater que les coefficients standardisés associés à la CP1 (-0,430) et à la CP3 (-0,244) pour le rendement en maïs-grain et à la CP1 (-0,513), à la CP3 (-0,218) et à la CP4 (0,290) pour le rendement en soya sont statistiquement significatifs ($P < 0,005$). Les facteurs-sols jouent un rôle important dans le développement de la croissance des cultures, à l'exception de la texture pour les deux types de culture. L'indice d'hydratation superficielle, la pente, l'élévation et la tonalité de gris (CP4), propriétés du MNT, principalement associés au drainage de la partie superficielle du sol, ont un effet sur le rendement en soya dans la zone argileuse. Cette composante (CP4) n'a aucun effet sur l'humidité du grain du maïs-grain et du soya.

Tableau 4.16: Régressions linéaires multiples mettant en relation le rendement et l'humidité du grain du maïs-grain et du soya avec les différentes composantes principales pour la zone argileuse.

	Maïs-grain		Soya	
	Coefficient standardisé	P	Coefficient standardisé	P
ACP dérivée des indicateurs de fertilité				
Rendement				
CP1 – réaction	-0,385	**0,006**	-0,428	**0,004**
CP2 – texture	-0,006	0,963	0,015	0,916
CP3 – gestion 1	0,376	**0,008**	0,252	**0,076**
CP4 – gestion 2	0,097	0,472	-0,069	0,621
	R multiple = 0,55	R^2multiple = 0,30	R multiple = 0,50	R^2multiple = 0,26
Humidité du grain				
CP1 – réaction	-0,417	**0,004**	-0,253	0,091
CP2 – texture	0,073	0,596	-0,196	0,187
CP3 – gestion 1	-0,261	**0,063**	-0,241	0,107
CP4 – gestion 2	0,151	0,277	0,080	0,586
	R multiple = 0,52	R^2multiple = 0,27	R multiple = 0,41	R^2multiple = 0,17
ACP dérivée des indicateurs de fertilité, de la CEA et du MNT				
Rendement				
CP1 – réaction -fertilité	-0,430	**0,004**	-0,513	**0,000**
CP2 – texture	-0,020	0,886	0,005	0,971
CP3 – travail du sol	-0,244	**0,087**	-0,218	**0,092**
CP4 – drainage	0,075	0,595	0,290	**0,027**
CP5 – gestion	0,108	0,442	-0,024	0,852
	R multiple = 0,51	R^2multiple = 0,26	R multiple = 0,63	R^2multiple = 0,40
Humidité				
CP1 – réaction -fertilité	-0,311	**0,024**	-0,217	0,143
CP2 – texture	0,182	0,178	-0,140	0,340
CP3 – travail du sol	0,398	**0,005**	0,284	**0,058**
CP4 – drainage	-0,191	0,158	-0,226	0,127
CP5 – gestion	0,081	0,545	0,053	0,715
	R multiple = 0,58	R^2multiple = 0,33	R multiple = 0,45	R^2multiple = 0,20

5. CONCLUSION

Le but de cette recherche était de générer un MNT à partir des données d'élévation mesurées à l'aide d'un système de positionnement par satellite en mode bi-fréquentiel, d'en dériver quelques attributs primaires et secondaires et d'en évaluer l'utilité dans un cadre de gestion spécifique d'agriculture de précision.

Lors du traitement préliminaire des diverses informations recueillies, une correction des erreurs de positionnement a dû être effectuée sur les données de rendement et d'humidité du grain, à cause d'un décalage existant entre la coupe des cultures et le moment de la mesure des débits. Suite à la simulation de différents décalages (5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 et 50 m), une comparaison des paramètres géostatistiques comme l'effet de pépites (C_o), l'estimation de l'erreur de mesure et du R^2 de la fonction de validation croisée, a permis d'établir un décalage de 25 m pour le maïs et de 20 m pour le soya. Une correction systématique du positionnement selon ces décalages a donc été réalisée. La démarche utilisée propose une approche rapide et efficace de mesure et de correction du décalage des positionnements des données de rendement.

L'analyse statistique exploratoire a permis de démontrer que plusieurs descripteurs (CEA et indicateurs de qualité du sol) présentaient une distribution bi-modale. L'algorithme à k-moyenne a été utilisé pour stratifier la parcelle en deux zones (approche stratifiée) d'aménagement, à partir de la conductivité électrique apparente des sols. Ces deux sous-populations étaient caractérisées par deux classes texturales bien distinctes (loam et argile) géographiquement connexes. Ces zones présentent des rendements en maïs et en soya ainsi que des propriétés de sols très différentes. La conductivité électrique apparente des sols constitue une variable auxiliaire très intéressante pour guider l'échantillonnage et la gestion spécifique et précise des sols. Cette technologie offre également une alternative complémentaire au travail du pédologue. La technique d'acquisition en temps réel est facile, rapide et peu dispendieuse et permet de recueillir une forte densité de mesures.

L'étude et la modélisation de la variabilité spatiale des différents descripteurs ont été effectuées à partir d'outils de la géostatistique. L'analyse de la variographie a permis d'évaluer la qualité de la structure spatiale et de la densité d'échantillonnage des descripteurs à l'étude. Pour la plupart des descripteurs étudiés, l'intervalle d'échantillonnage utilisé a permis de

modéliser leur variabilité spatiale avec fiabilité. Toutefois, une densité d'échantillonnage plus forte aurait été nécessaire pour révéler une structure spatiale plus fine pour le pH_{smp}, la teneur en MO, en P et en Al.

Une analyse en composantes principales, technique statistique utilisée pour regrouper et éliminer la multi-collinéarité existante entre les descripteurs, génère des composantes distinctes, qu'on utilise l'approche globale (parcelle) ou stratifiée (zone loameuse et argileuse). Les conclusions apportées aux divers modèles de prédictions (analyse de régression linéaire multiple) sont aussi influencées par l'approche utilisée. L'analyse de régression linéaire multiple, mettant en relation le rendement des cultures et les composantes de l'ACP a permis de démontrer que le rendement des cultures est principalement influencé par la fertilité intrinsèques du sol (texture, CEC, cations, CE), la réaction (pH, Ca, Al) et la microtopographie. La fertilité induite par la gestion (P et K) n'influence pas significativement les rendements. L'effet de la microtopographie était moindre que prévu, probablement dû aux conditions climatiques favorables de 1998 et 1999 qui n'ont pas permis de mettre en évidence les limitations naturelles du sol.

Dans d'autres études sur le sujet il faudrait réévaluer la stratégie d'échantillonnage des données topographiques, puisque les données étaient récoltées dans le sens de la longueur du champ. Une récolte de données dans le sens de la largeur pourrait peut-être améliorer la qualité du modèle et permettre d'obtenir des relations plus significatives. L'utilisation d'une résolution spatiale plus fine (*v.g.* 2 m x 2m au lieu de 5 m x 5 m) favoriserait peut-être une meilleure correspondance entre les différentes couches d'informations. Une typologie des formes de terrain pourrait être développée pour simplifier l'interprétation des résultats. De plus, il serait possible, à partir de la typologie, de créer des regroupements en fonction des zones et de mettre en relation les classifications morphologiques avec le rendement, les indicateurs de fertilité du sol, la CEA et les propriétés du MNT.

Cette étude n'a pas permis de répondre à l'hypothèse sous-jacente à savoir que la variation microtopographique a une influence sur la qualité des sols. L'effet de la microtopographie sur le rendement des cultures a été plutôt faible pour les deux années à l'étude. Cependant l'examen visuel des cartes de rendement et de quelques attributs du MNT permet d'établir localement un effet, sur le rendement en maïs, des mauvaises conditions de drainage associées à la microtopographie (fossé de drainage).

6. BIBLIOGRAPHIE

Aronoff, S. (1995) *Geographic information systems: A management Perspective*. WDL Publications, Ottawa. 294 p.

Association des fabricants d'engrais du Québec (1999) Guide de fertilisation, 5e édition, Québec. 190 p.

Behrens, T.M. (2000) (page consultée en juillet 2001) DEMAT - DEM Analysis Tool. Adresse URL: http: //gis.esri.com/arcscripts.

Bell, J.C., Butler, C.A. et Thompson, J.A. (1995) Soil-terrain modelling for site-specific agricultural management. Dans: *Site-specific management for agricultural systems*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), Madison, WI, (ASA-CSSA-SSSA). pp.209-227.

Bernier, M. (1997). [Conférencière invitée]. Les principes de la télédétection et ses possibilités en agriculture. Dans: *Colloque Nouvelles technologies en agriculture*, Campus du Fort St-Jean, Saint-Jean-sur-le Richelieu, QC. pp. 112-119.

Blackmore, B.S. et Marshall, C.J. (1996) Yield Mapping; Errors and Algorithms. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Third International Conference*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), Minneapolis, MN, (ASA-CSSA-SSSA). pp. 403-416.

Blackmore, B.S. et Moore, M. (1999) Remedial correction of yield map data. *Precision Agriculture*. 1: 53-66.

Blue Marble Geographics. (1998) The geographic transformer, Version 4.00. The Geographics Software Component Company. Gardiner, Maine, USA. http://www.bluemarblegeo.com

Bonn, F. et Rochon, G. (1993) *Précis de télédétection. Volume 1: Principes et méthodes.* Sainte-Foy, Presses de l'université du Québec/AUPELF. 485 p.

Bourennane, H., King, D., Chéry, P. et Bruand, A. (1996) Improving of soil variable using slope gradient as external drift. *European J. Soil Sci.* 47: 473-483.

Braum, S.M., Hinds, P., Malzer, G.L., Bell, J., Mulla, D. et Robert P.C. (1999) Terrain attributes and soil nitrogen: spatial effects on corn yield responses to nitrogen fertilization for northern glaciated landscape. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fourth International Conference*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), St-Paul, MN, (ASA-CSSA-SSSA), pp. 195-201.

Brubaker, S.C., Jones, A.J., Lewis, D.T. et Frank, K. (1993) Soil properties associated with landscape positions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 235-239.

Brubaker, S.C., Jones, A.J., Frank, K. et Lewis, D.T. (1994) Regression for estimating properties by landscape position. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1763-1767.

Burrough, P.A. (1986) *Principles of geographical information systems for land resources assessment.* Oxford University Press, New York, 194 p.

Cattell, R.B. (1966) *The scree test for the number of factors. Multivariate Behavioural Research.* 1: 245-276.

Chaplot, V., Walter, C. et Curmi, P. (2000a) Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data. *Geoderma*. 97: 405-422.

Chaplot, V., Walter, C., Curmi, P. et Hollier-Larousse, A. (2000b) The use of auxiliary geophysical data to improve a soil-landscape model. *Soil Science*. 165(12): 961-970.

Clark, R.L. et Lee, R. (1996) Topo Maps the Fast Way. *Precision Farming*. pp. 26-31.

Clark, R.L. (1996) A comparison of rapid GPS techniques for topographic mapping. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Third International Conference*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), Minneapolis, MN, (ASA-CSSA-SSSA). pp.651-662.

Colvin, T.S. et Arslan, S. (2000) A review of yield reconstruction and sources of errors in yield maps. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fifth International Conference,* P.C. Robert et *al.* (Éds.), Madison, WI, (ASA-CSSA-SSSA). CD-ROM, fichier 10.pdf, 13 p.

Comité d'experts sur la prospection pédologique d'Agriculture Canada (CEPPAC) (1987) *Le système canadien de classification des sols.* Seconde édition. Agriculture Canada, Publication 1646. 170 p.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ) (1996). Grilles de référence en fertilisation, 2ième édition, Agdex 540. 128 p.

Corbley, K.P. (1997) Farmers mapping highs and lows. *Modern Agriculture*. pp. 14-17.

Deguise, J.C. et McNairn, H. (2000) Hyperspectral remote sensing for precision agriculture. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fifth International Conference*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), Madison, WI, (ASA-CSSA-SSSA). CD-ROM, fichier64.pdf, Abstract.

Depraetere, C. (1991) *DEMIURGE (Digital Elevation Model In URGEncy). Chaîne de production et de traitement de modèles numériques de terrain.* Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (1996a) *Using ArcView GIS.* Environmental Systems Research Institute , Redlands, C.A. 340 p.

ESRI (1996b) *ArcView Spatial Analyst.* Environmental Systems Research Institute, Redlands, C.A. 148 p.

ESRI (1998) *ArcView Image Analysis.* ERDAS, Redlands, C.A. 210 p.

Florinsky, I.V., Eilers, R.G. et Lelyk, G.W. (2000) Prediction of soil salinity risk by digital terrain modelling in Canadian prairies. *Can. J. Soil Sci.* 80: 455-463.

Forand, G. (2000) Analyse et intégration des données de sols et de rendements de maïs grain et de soya provenant d'une ferme en transition vers l'agriculture de précision. Mémoire, Université Laval, Sainte-Foy. 118 p.

Fridgen, J.J., Kitchen, N.R. et Sudduth, K.A. (2000) Variability of soil and landscape attributes within sub-field management zones. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fifth International Conference:*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), Madison, WI, (ASA-CSSA-SSSA). CD-ROM, fichier87df, 16 p.

Fritz, R.M, Malo, D.D., Schumacher, T.E., Clay, D.E., Carlson, C.G., Ellsbury, M.M. et Dalsted, K.J. (1999) Field comparison of two soil electrical conductivity measurement systems. Dans : *Precision Agriculture, Proc. of the Fourth International Conference,* P.C. Robert et *al.* (Éds.), St-Paul, MN, (ASA-CSSA-SSSA). pp.1211-1217.

Gessler, P., Mckenzie, N. et Hutchinson, M. (1996) Process in soil-landscape modelling and spatial prediction of soils attributes for environmental models. Dans: *Integrating GIS and Environmental Modelling, Proc. of the Third International Conference/Workshop*. NCGIA Publications Office, Santa Fe. National Centre for Geographic Information and Analysis. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/gessler_paul/my_paper.html.

Gessler, P.E. Chadwick, O.A., Chamran, F., Althouse, L.. et Holmes K. (2000) Modelling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2046-2056.

Goddard, T. Kryzanowski, L., Cannon, K., Izaurralde, C. et Martin, T. (1996) Potential of integrated GIS-Agriculture models for prediction farming systems. Dans: *Integrating GIS and Environmental Modelling, Proc. of the Third International Conference/Workshop*. NCGIA Publications Office, Santa Fe. National Centre for Geographic Information and Analysis. http://ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/gessler_paul/my_paper.html.

Goodchild, M.F. Kemp, K.K., Thériault, M. et Roche, Y. (1996) *Système d'information géographique*. Notes de cours. Vol 1. Notion de base. Département de géographie. Université Laval. Québec. 367 p.

Grenon, L., Cossette J.M., Deschênes, M.J. et Lamontagne, L. (1999) *Étude pédologique du comté de Rouville, Québec.* Sainte-Foy (Québec) Centre de recherche sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada. 263 p.

Haneklaus, S., Lilienthal, H., Schnug, E., Panten, K. et Haveresch, E. (2000) Routines for efficient yield mapping. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fifth International Conference:,* P.C. Robert, et *al.* (Éds.),Madison, WI, (ASA-CSSA-SSSA), CD-ROM, fichier 96.pdf, 11p.

Hendershot, W.H., Lalande, H. et Duquette, M. (1993) Soil reaction and exchangeable acidity. Dans: *Soil sampling and methods of analysis*, M.R. Carter (Éd.), Boca Raton, Lewis publishers. pp. 187-200.

Horn, B.P.K. (1981) Hillshading and the reflectance map. Dans: *Proc. of the IEEE*, 69(1): 14-47.

Jacobs, A. et Dunn Jr., R.F. (1998) *Soil conductivity surveys gather hundreds of geo-referenced readings on physical soil properties for every acre you farm. Proponents contend the resulting more precise soil maps promote better management of field zones*. Precision Ag Illustrated. pp. 20-25.

Khakural, B.R., Robert, P.C. et Mulla, D.J. (1996) Relating corn/soybean yield to variability in soil and landscape characteristics. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Third International Conference*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), Minneapolis, MI, (ASA-CSSA-SSSA). pp.117-127.

Kohler, M.F. (2001) Using Geographic Information Systems to Produce Time Area Diagrams for the Clark Hydrograph Method. Thèse. Florida Atlantic University, Florida, 133 p.

Lamontagne, L. et Nolin, M.C. (1997) Cadre pédologique de référence pour la corrélation des sols. Publication conjointe du CRDSGC, Sainte-Foy (Bulletin #7) et du CRECO, Ottawa (Contribution #971123), 69 pp.

Larson, W.E. et Robert, P.C. (1991) Farming by soil. Dans: Soil management for sustainability R. Lal et F.J. Pierce (Eds.). Soil Water Conserv. Soc. pp 103-109.

Leclerc, M.L., Nolin, M.C., Cluis, D. et Simard, R.R. (2001) Grouping soils of the Montreal Lowlands (Quebec) according to fertility and P sorption and desorption characteristics. *Can. J. Soil Sci.* 81:71-83.

Legendre, L. et Legendre, P. (1998*) Numerical Ecology. Developments in environmental modelling 20*, Second English edition, Elsevier Science B.V., Amsterdam. 853 p.

Le Guen, M. (2001) *La boîte à moustaches de Tukey un outil pour initier à la statistique.* CNRS-Matisse, 14 p.

Lund, E.D., et Christy, C.D. (1998) Using electrical conductivity to provide answers for precision farming. Dans: *Geospatial in Agriculture and Forestry, Proc. of the First International Conference,* Orlando, Floride. pp.1-8.

Lund, E.D., Christy, C.D. et Drummond, P.E. (1999) Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fourth International Conference:*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), St-Paul, MN, (ASA-CSSA-SSSA). pp 1089-1100.

Lund, E.D, Christy, C.D. et Drummond, P.E. (2000) Using yield and soil electrical conductivity (EC) maps to derive crop production performance information. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fifth International Conference:*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), Madison, WI (ASA-CSSA-SSSA). CD-ROM, fichier 234.pdf, 10 p.

MacMillan, R.A., Pettapiece, W.W., Watson, L.D. et Goddard, T.W. (1999) A landform segmentation model for precision farming. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fourth International Conference*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), St-Paul, MN, (ASA-CSSA-SSSA). pp. 1335-1346.

Masson, D. et Maidment, D.R. (2000) *An analysis of a methodology for generating watershed parameters using GIS*. Centre for Research in Water Resources. University of Texas, Austin. 191 p.

McConkey, B.G., Ulrich, D.J. et Dyck, F.B. (1997) Slope position and subsoiling effects on soil water and spring wheat yield. *Can. J. Soil Sci.* 77: 83-90.

Michaud, A., Landry, I. et Desmarais C. (2000) Intégrer des données à référence spatiale sans perdre la carte. Dans: *Premier Colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision*. Sainte-Hyacinthe, Québec. pp. 173-191.

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.

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

Moore, I.D., Gessler, P.E, Nielsen, G.A. et Peterson, G.A. (1993b) Terrain analysis for soil specific crop management. Dans: *Proc. of the First International conference: Precision Agriculture*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), Minnesota, (ASA-CSSA-SSSA). pp. 27-55.

Nolin, M.C. et Caillier, M.J. (1992) La variabilité des sols. II- Quantification et amplitude. *Agrosol* 5 (1): 15-20.

Nolin, M.C., Cambouris, A.N. et Simard, R.R. (1997) La variabilité des sols: son origine et sa gestion. Dans: *Le centre de télédétection en agro-environnement. Nouvelles technologies en agriculture*. Actes de colloque. Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec. pp. 35-77.

Nolin, M.C. et Lamontagne, L. (1990) *Étude pédologique du comté de Richelieu (Québec), volume 1: Description et interprétation des unités cartographiques.* Sainte-Foy (Québec) Centre de recherche sur les sols et les grandes cultures Agriculture et Agroalimentaire Canada. 287 p.

Nolin, M.C., Vallée, L., Cambouris, A.N. et Karam, A. (2000) Variabilité et structure d'organisation spatiale des sols. Dans: *Premier colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision*. Sainte-Hyacinthe, Québec. pp. 143-173.

Nolin, M.C., Wang, C. et Caillier, M.J. (1989) Fertility grouping of Montreal Lowlands soil mapping units based on selected soil characteristics of the plot layer. *Can. J. Soil Sci.* 69: 525-541.

Nugteren, W.A., Malo, D.D., Schumacher, T.E., Schumacher, J.A., Carlson, C.G., Clay, D.E., Clay, S.A., Dalsted, K.J. et Ellsbury, M.M. (2000) Hillslope chronosequence of electromagnetic induction readings as influenced by selected soil properties. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fifth International Conference:*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), Madison, WI, (ASA-CSSA-SSSA). CD-ROM, fichier 145.pdf, 8 p.

Olivera, F. et Maidment, D.R. (1999) GIS tools for HMS Modelling Support. Dans: 19th Annual *ESRI International User Conference*, San Diego, California. (http://www.ce.utexas.edu//prof/olivera/esri99/p.801.htm)

Ovalles, F.A. et Collins, M.E. (1986) Soil-landscape relationships and soil variability in north central Florida. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 401-408.

Piekutowski, T. (2000) Traitements et intégration des données géoréférencées pour l'agriculture de précision. Dans: *1er Colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision*, Ste-Hyacinthe, Québec (CPVQ), pp. 194-208.

Robertson, G.P. (2000) Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design Software. Michigan. 200 p.

Schut, G.H. (1976) Review of interpolation methods for digital terrain models. *The Canadian surveyor*, 30 (5): 389-412.

Sheldrick, B.H. et Wang, C. (1993) Particle size distribution. Dans: *Soil sampling and methods of analysis*, M.R. Carter (Éd.) Boca Raton, Lewis publishers. , pp. 499-517.

Simmons, F.W., Cassel, D.K. et Daniels, R.B. (1989) Landscape and soil property effects on corn grain yield response to tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 534-539.

Stone, J.R., Gilliam, J.W., Cassel, D.K., Daniels, R.B., Nelson, L.A. et Kleiss, H.J. (1985) Effect of erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 987-991.

Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Birrell, S.J. et Kitchen, N.R. (1996) Analysis of spatial factors influencing crop yield. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Third International Conference,* P.C. Robert et *al.* (Éds.), Minneapolis, MN, (ASA-CSSA-SSSA), pp.129-139.

Sudduth, K.A., Kitchen, N.R. et Drummond, S.T. (1999) Soil conductivity sensing on claypan soils: Comparison of electromagnetic induction and direct methods. Dans: *Applications of electromagnetic methods – Agriculture*, Geonics limited, Mississauga, Ontario.

SYSTAT Inc. (1992) *SYSTAT for Windows, Version 7.0.1.* U.S.A, Statistic Evanston Il. 751 p.

Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G. et Rompré, M. (1990) *Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec.* Gouvernement du Québec, MAPAQ, Québec. 71 p.

Tiessen, H. et Moir, J.O. (1993) Total and organic carbon. Dans: *Soil sampling and methods of analysis*, M.R. Carter (Éd.), Boca Raton, Lewis publishers. pp. 187-200.

Timlin, J. D., Pachepsky, Y.A., Snyder, V. A. et Bryant, R. B. (1999) Soil surface curvature and the spatial and temporal variability of corn grain yields on a hillslope. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fourth International Conference:*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), St-Paul, MN (ASA-CSSA-SSSA). pp. 203-215.

Tran, T. et Simard, R. (1993) Mehlich III extractable elements. Dans: *Soil sampling and methods of analysis*, M.R. Carter (Éd.), Boca Raton (Floride), Lewis publishers. pp. 43-49.

Tran, T. et van Lierop, W. (1993) Lime requirement. Dans: *Soil sampling and methods of analysis*, M.R. Carter (Éd.), Boca Raton (Floride), Lewis publishers. pp. 109-113.

Vallée, L. (2001) Utilisation de la conductivité électromagnétique pour l'étude de la structure spatiale et l'estimation de propriété du sol dans trois agroécosystèmes tempérés humides du Québec. Thèse de doctorat (version préliminaire soumise pour évaluation) Université Laval. Sainte-Foy. 123 p.

Viau, A. (2000) La géomatique et la collecte des données en agriculture de précision. Dans: *Premier colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision.* 23-24 mars, Ste-Hyacinthe, Qc. pp. 117-127.

Vigier, B., Topp, G.C., McLaughlin, N.B. et Gregorich, E.G. (2000) Une évaluation du système VERIS pour la mesure de la conductivité électrique du sol. *Poster présenté et sommaire publié au Premier colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision.* Sainte-Hyacinthe, Québec.

Wang, C., Nolin, M.C. et Wu, J. (1996) Microrelief and spatial variability of some selected soil properties on agricultural benchmark site in Quebec, Canada. Dans: *Precision Agriculture, Proc. of the Fourth International Conference*, P.C. Robert et *al.* (Éds.), St-Paul, MN, (ASA-CSSA-SSSA),. pp. 339-350.

Wilding, L.P. et Drees, L.R. (1983) Spatial variability and pedology. Dans: Pedogenesis and soil taxonomy, vol. 1: Concepts and interactions, L.P. Wilding et al. (Éds.) Elsevier, Texas, USA. pp.83-116.

Wilding, L.P. (1985) Spatial variability: its documentation accommodation and implication to soil surveys, Dans: *Soil spatial variability. Proc. of a workshop of the ISSS and the SSSA*, D.R. Nielsen et J. Bouma (Éds.), Pudoc Wageningen, Las Vegas, USA. pp. 166-194.

Wilson, J.P, Spangrud, D.J., Nielsen, G.A, Jacobsen, J.S. et Tyler, D.A. (1995) Sensitivity of computed terrain attributes to the number and pattern of GPS-derived elevation data. Dans: *Site-Specific Management for Agricultural Systems.* Madison, WI (ASA-CSSA-SSSA). pp. 285-300.

Wright, R.J., Boyer, .D.G., Winant, M.M. et Perry H.D. (1990) The influence of soil factors on yield differences among landscape positions in an Appalachian cornfield. *Soil Science* 149(5): 375-382.

Young, F.J. et Hammer, R.D. (2000) Defining geographic soil bodies by landscape position, soil taxonomy, and cluster analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 989-998.

Zevenbergen, L.W. et Thorne, C.R. (1987) Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms.*12: 47-56.

ANNEXE 1: HISTOGRAMME FRÉQUENTIEL

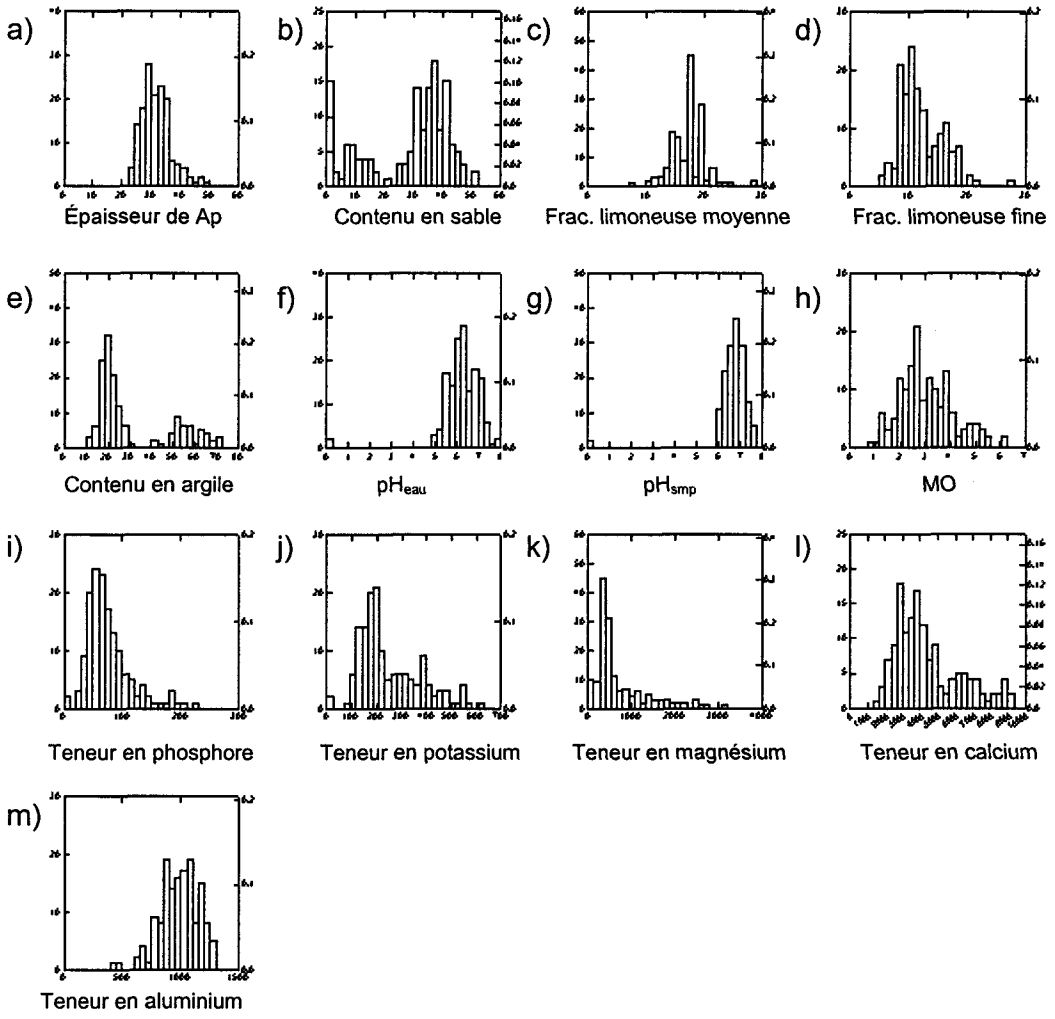


Figure A.1.1 : Histogramme fréquentiel de la densité de distribution de la population : a) épaisseur de l'horizon Ap, b) contenu en sable, c) fraction limoneuse moyenne, d) fraction limoneuse fine, e) contenu en argile, f) pH$_{eau}$, g) pH$_{smp}$, h) teneur en matière organique, i) teneur en phosphore, j) teneur en potassium, k) teneur en magnésium, l) teneur en calcium et m) teneur en aluminium.

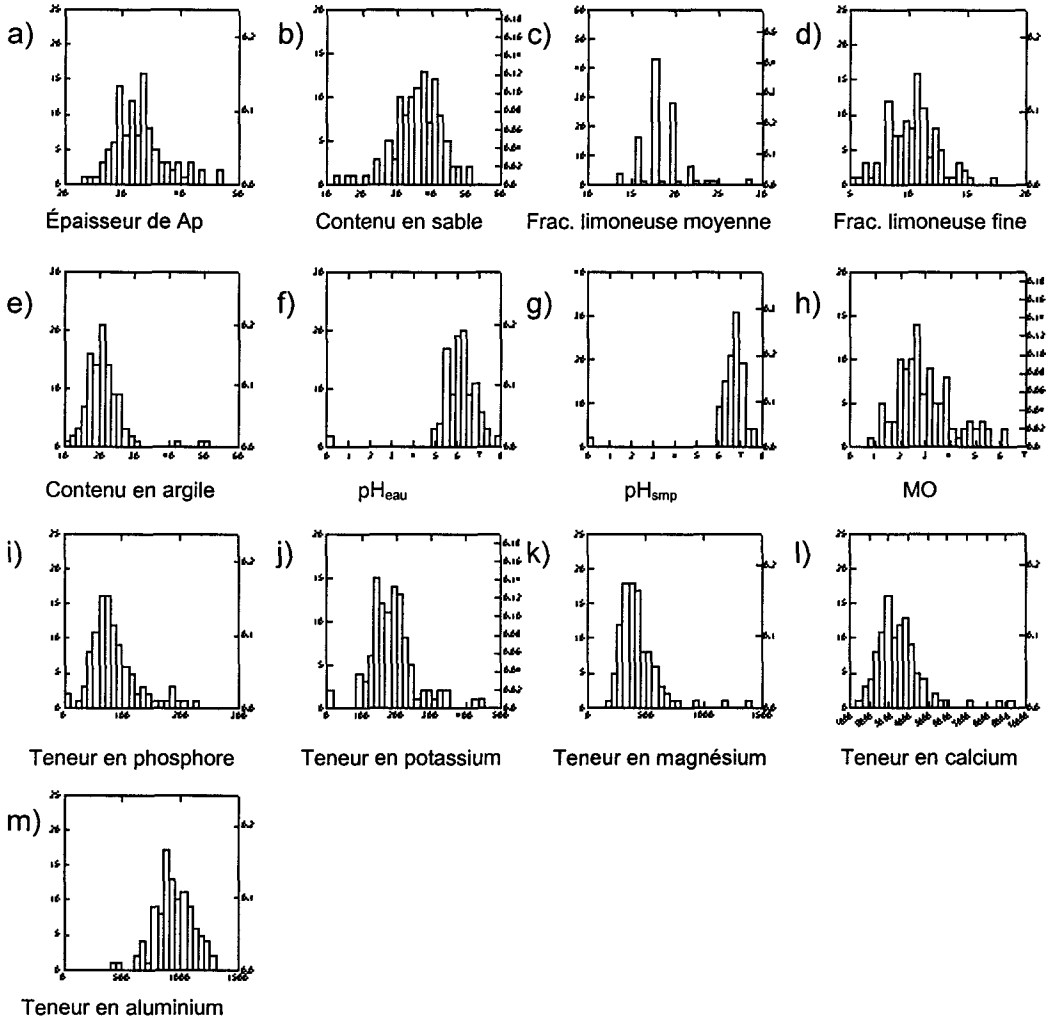


Figure A.1.2 : Histogramme fréquentiel de la densité de distribution du groupe 1 : a) épaisseur de l'horizon Ap, b) contenu en sable, c) fraction limoneuse moyenne, d) fraction limoneuse fine, e) contenu en argile, f) pH_{eau}, g) pH_{smp}, h) teneur en matière organique, i) teneur en phosphore, j) teneur en potassium, k) teneur en magnésium, l) teneur en calcium et m) teneur en aluminium.

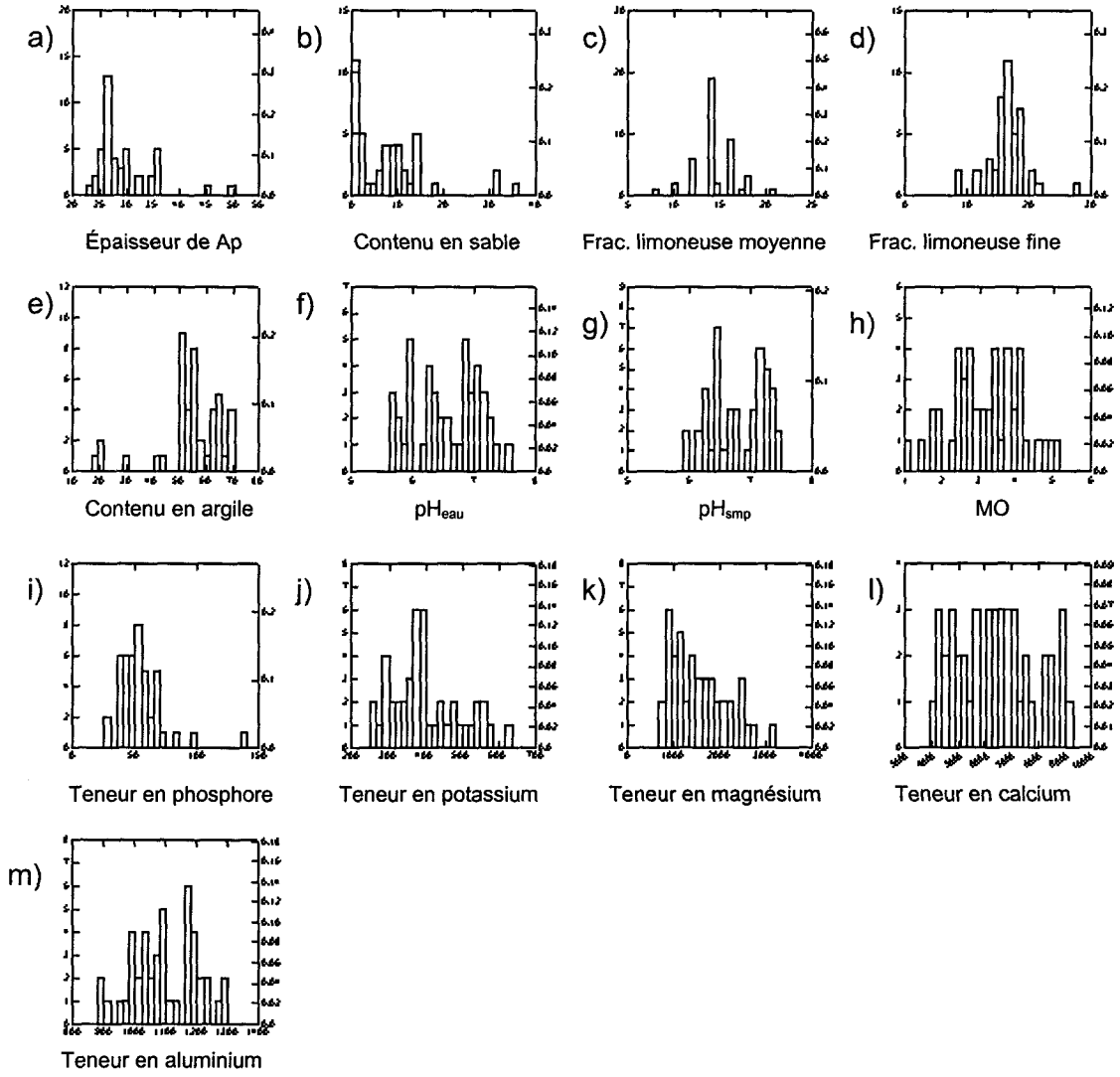


Figure A.1.3 :Histogramme fréquentiel de la densité de distribution du groupe 2: a) épaisseur de l'horizon Ap, b) contenu en sable, c) fraction limoneuse moyenne, d) fraction limoneuse fine, e) contenu en argile, f) pH_{eau}, g) pH_{smp}, h) teneur en matière organique, i) teneur en phosphore, j) teneur en potassium, k) teneur en magnésium, l) teneur en calcium et m) teneur en aluminium.