

Université du Québec  
Institut National de la Recherche Scientifique  
INRS-EAU

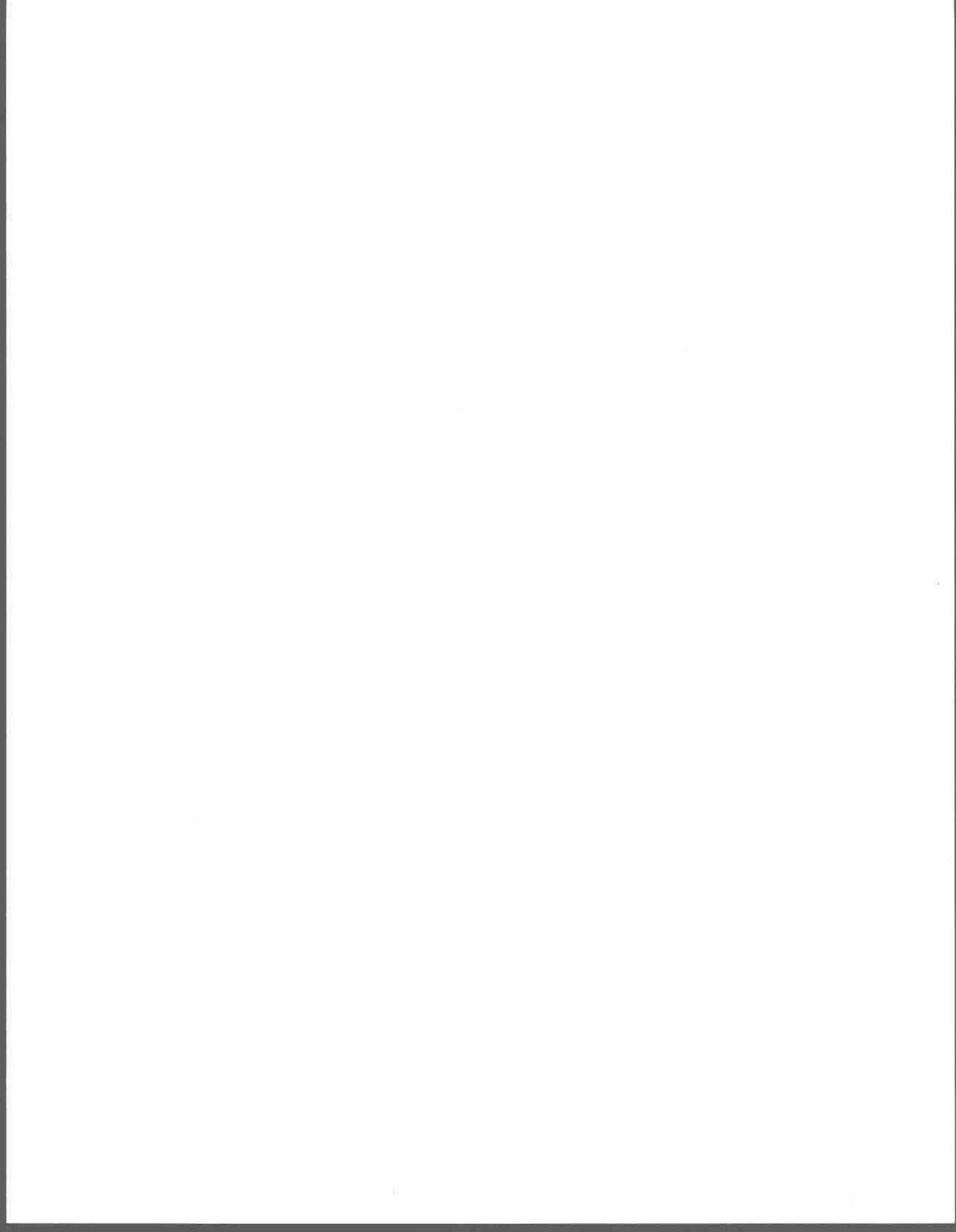
**GROUPEMENT DES SOLS DU SUD-EST DE LA PLAINE DE  
MONTRÉAL SELON LEUR CAPACITÉ DE FIXATION DU P  
AU MOYEN DES STATISTIQUES MULTIDIMENSIONNELLES**

Par

**Marie-Line Leclerc**

Mémoire  
présenté pour l'obtention  
du grade de Maître es sciences (M.Sc)

Novembre 1999



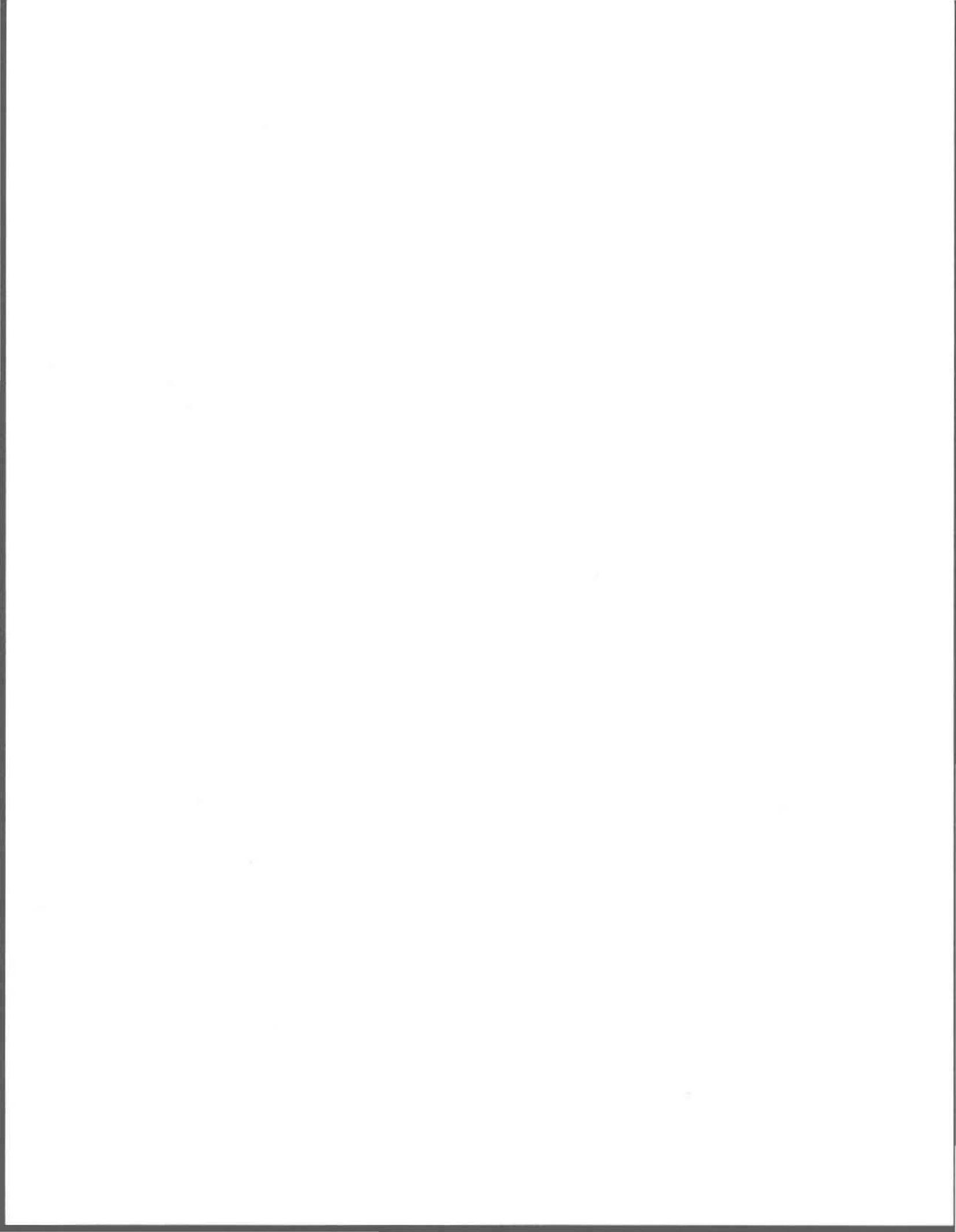
## REMERCIEMENTS

---

Je tiens à remercier pour leurs encouragements, leurs expertises scientifiques et leur support tout au long de mon projet de recherche, mon directeur Daniel Cluis et mon codirecteur, Michel C. Nolin, du Centre de recherche et de développement sur les sols et grandes cultures (CRDSGC) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Mes remerciements vont aussi aux techniciens de laboratoire d'Agriculture et Agroalimentaire Canada pour les nombreuses analyses de sols effectuées pour compléter la banque de données. Je remercie plus spécifiquement Claude Lévesque de m'avoir fait profiter de son expérience relative aux diverses méthodes d'analyses de sol utilisées dans notre étude. Je remercie également l'équipe du CRDSGC pour son appui et pour l'utilisation de ses équipements informatiques durant l'été 98.

Cette recherche a été réalisée grâce au soutien financier du Conseil des recherches en pêche et en agroalimentaire du Québec (CORPAQ) et du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).



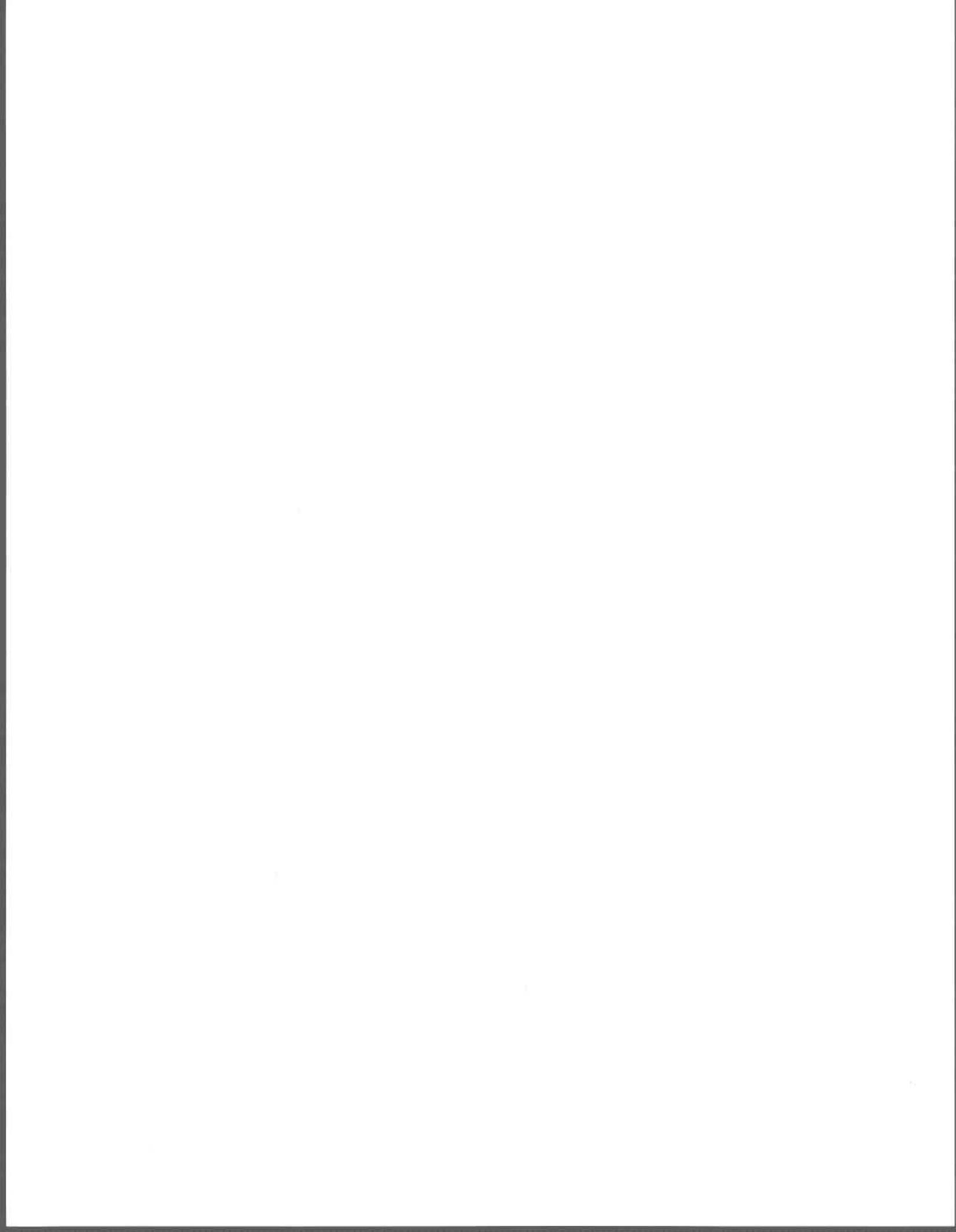
## RÉSUMÉ

---

Les indicateurs du contenu en phosphore disponible dans le sol actuellement utilisés pour calculer les besoins en fertilisants phosphatés des cultures sont en général non adaptés pour prédire les risques de contamination en P dans les eaux de surface. La capacité de fixation et un indicateur de désorption du P devraient être incorporés aux indicateurs utilisés pour élaborer les recommandations de fertilisation. L'objectif de cette étude était de développer un regroupement de sols du sud-est de la plaine de Montréal en classes de comportement homogène, basé aussi bien sur les caractéristiques reliées au P que sur les propriétés physico-chimiques de ces sols. Pour bien représenter les sols de la région à l'étude, 39 séries et 66 types de sols ont été sélectionnés. Les techniques de l'analyse multidimensionnelle ont servi à générer et interpréter les groupements de sols. En plus des informations pédologiques déjà présentes dans la banque de données telles que la granulométrie, la teneur en matière organique, la C.E.C. et P extractible selon la méthode Bray-2 (méthodes traditionnelles), les échantillons ont été caractérisés au moyen d'autres analyses: éléments biodisponibles extractibles au Mehlich III (méthode utilisée actuellement dans les laboratoires de sols), ainsi que certains indicateurs de la sorption et de la désorption du P, soit l'indice de Bache et Williams (PSI), P, Fe et Al extraits à l'oxalate d'ammonium (POX, FEOX, ALOX) et P soluble à l'eau (PW) ainsi que deux indices de saturation en P dérivés de ces indicateurs ( $[100.PM3/ALM3]$  et  $[POX/(ALOX+FEOX)]$ ).

L'analyse du dendogramme obtenu par la méthode de groupement hiérarchique de Ward appliquée sur les composantes principales ont permis de qualifier le comportement des types de sols et séries de sols étudiés quant à leur fertilité inhérente, leur texture et leur capacité de fixation du P. La texture, le contenu en sesquioxydes de fer et d'aluminium, la présence de carbonates dans le substratum ont permis de séparer les sols fixateurs des sols plus enclins à désorption du P. L'analyse discriminante effectuée sur les variables modernes et traditionnelles a démontré que les variables relatives à la texture, aux contenus en calcium ou en aluminium étaient les plus utiles dans la différenciation des groupes.

Cette étude a montré que les propriétés physico-chimiques des sols peuvent être efficacement utilisées, conjointement avec les indicateurs de capacité de fixation et désorption du P pour identifier les sols vulnérables à la pollution des eaux de surface par le P.



# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>III</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>V</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTES DES TABLEAUX</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVUE DE LITTÉRATURE</b> .....	<b>5</b>
2.1 PROBLÉMATIQUE DU PHOSPHORE AU QUÉBEC .....	5
2.2 LA POLLUTION DIFFUSE ET PONCTUELLE .....	6
2.3 FERTILISATION À LONG TERME DES SOLS .....	7
2.4 EFFETS SUR LES MILIEUX AQUATIQUES .....	9
2.5 MOUVEMENT DU PHOSPHORE .....	10
2.6 INDICATEURS RELATIFS AU PHOSPHORE .....	13
2.6.1 <i>Capacité de fixation des sols</i> .....	13
2.6.2 <i>La solubilité, la disponibilité et la désorption du phosphore du sol</i> .....	15
2.6.3 <i>Effet à long terme: saturation des sols en phosphore</i> .....	16
2.7 RECOMMANDATIONS DE FERTILISANTS .....	19
2.8 RÈGLEMENT SUR LA RÉDUCTION DE LA POLLUTION AGRICOLE .....	22
2.9 ÉTABLISSEMENT DE GROUPES DE GESTION DES SOLS .....	23
<b>3. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE</b> .....	<b>27</b>
3.1 DESCRIPTION DU TERRITOIRE .....	27

3.1.1	<i>Le territoire à l'étude</i> .....	27
3.1.2	<i>Cadre agricole</i> .....	27
3.1.3	<i>Cadre climatique de la région</i> .....	31
3.1.4	<i>Cadre pédologique</i> .....	32
3.2	DESCRIPTION DES INDICATEURS DE LA BANQUE DE DONNÉES.....	36
3.2.1	<i>Sélection des indicateurs de la banque de données</i> .....	36
3.2.2	<i>Propriétés utilisées pour l'interprétation des groupements</i> .....	39
3.3	ANALYSES ET TRAITEMENTS STATISTIQUES DES DONNÉES.....	43
3.3.1	<i>Statistiques descriptives et analyses de la normalité</i> .....	43
3.4	ANALYSE MULTIVARIÉE .....	50
3.4.1	<i>Analyse en composantes principales</i> .....	51
3.4.2	<i>Groupement hiérarchique</i> .....	53
3.4.3	<i>Analyse discriminante</i> .....	54
3.4.4	<i>Analyse de variance</i> .....	55
<b>4.</b>	<b>RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION</b> .....	<b>57</b>
4.1	GROUPEMENT EFFECTUÉ SUR LES TYPES DE SOL À PARTIR DES DESCRIPTEURS DE LA COUCHE DE SURFACE .....	57
4.1.1	<i>Relation entre les variables étudiées</i> .....	57
4.1.2	<i>Analyse en composantes principales</i> .....	60
4.1.3	<i>Classification hiérarchique</i> .....	65
4.1.4	<i>Interprétation des groupements</i> .....	68
4.1.4.1	Ordination des pointages dans l'espace réduit défini par les composantes principales sélectionnées.....	68
4.1.4.2	Analyse de variance.....	73
4.1.4.3	Description des regroupements de sols.....	78
4.1.5	<i>Analyse discriminante</i> .....	80
4.1.5.1	Analyse discriminante effectuée sur l'ensemble des variables.....	80
4.1.5.2	Analyse discriminante effectuées sur les variables modernes .....	84

4.1.5.3	Analyse discriminante effectuée sur les variables M3 seulement .....	85
4.1.5.4	Analyse discriminante effectuée sur les variables traditionnelles .....	87
4.1.6	<i>Résumé</i> .....	88
4.2	GROUPEMENT EFFECTUÉ SUR LES SÉRIES DE SOLS À PARTIR DES DESCRIPTEURS DU SOUS-SOL.....	90
4.2.1	<i>Relations entre les variables étudiées</i> .....	90
4.2.2	<i>Analyse en composantes principales</i> .....	92
4.2.3	<i>Groupement hiérarchique</i> .....	96
4.2.4	<i>Interprétation des groupements</i> .....	98
4.2.4.1	Ordination des pointages dans l'espace réduit défini par les composantes principales sélectionnées .....	98
4.2.4.2	Analyse de variance .....	103
4.2.4.3	Description des regroupements de sols.....	106
4.2.5	<i>Analyse discriminante</i> .....	108
4.2.5.1	Analyse discriminante effectuée sur l'ensemble des variables .....	108
4.2.5.2	Analyse discriminante effectuées sur les variables modernes.....	110
4.2.5.3	Analyse discriminante effectuée sur les variables traditionnelles.....	111
4.2.6	<i>Résumé</i> .....	112
4.3	GROUPEMENT EFFECTUÉ SUR LES SÉRIES DE SOLS À PARTIR DES DESCRIPTEURS DU SUBSTRATUM.....	114
4.3.1	<i>Relation entre les variables étudiées</i> .....	114
4.3.2	<i>Analyse en composantes principales</i> .....	116
4.3.3	<i>Groupement hiérarchique</i> .....	120
4.3.4	<i>Interprétation des groupements</i> .....	122
4.3.4.1	Ordination des pointages dans l'espace réduit défini par les composantes principales sélectionnées .....	122
4.3.4.2	Analyse de variance .....	125
4.3.4.3	Description des regroupements de sols.....	128
4.3.5	<i>Analyse discriminante</i> .....	130

4.3.5.1	Analyse discriminante effectuée sur l'ensemble des variables.....	130
4.3.5.2	Analyse discriminante effectuée sur les variables modernes.....	131
4.3.5.3	Analyse discriminante effectuée sur les variables traditionnelles .....	132
4.3.6	<i>Résumé</i> .....	133
4.4	MODÈLE DÉDUCTIF DE CLASSIFICATION DES SOLS SELON LEUR CAPACITÉ DE FIXATION DU PHOSPHORE.....	135
<b>5.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>139</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>145</b>
<b>ANNEXE A: REPRÉSENTATION DES COMTÉS PÉDOLOGIQUES ET M.R.C. DE LA RÉGION ÉTUDIÉE</b> .....		<b>155</b>
 <b>ANNEXE B: DESCRIPTION DES SOLS</b> .....		<b>157</b>
 <b>ANNEXE C: COMPARAISON DES INDICES G1 ET G2 DES VARIABLES BRUTES ET TRANSFORMÉES</b> .....		<b>163</b>
 <b>ANNEXE D: GROUPEMENT DES TYPES DE SOLS À PARTIR DES DESCRIPTEURS DE LA COUCHE DE SURFACE</b> .....		<b>167</b>
 <b>ANNEXE E: GROUPEMENT DES SÉRIES DE SOLS À PARTIR DES DESCRIPTEURS DU SOUS-SOL</b> .....		<b>171</b>
 <b>ANNEXE F: GROUPEMENT DES SÉRIES DE SOLS À PARTIR DES DESCRIPTEURS DU SUBSTRATUM</b> .....		<b>175</b>
 <b>ANNEXE G: CLASSIFICATION DES SOLS SELON LE MODÈLE ÉTABLI À PARTIR DES INDICATEURS TRADITIONNELS</b> .....		<b>177</b>

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 2.1: Différentes formes de transport du P vers les eaux de surface.....	11
Figure 2.2: Relations entre les différentes formes de phosphore dans le sol.....	16
Figure 3.1: Superficies de terres cultivées recevant des fumiers et lisiers selon divers modes d'épandage.....	30
Figure 3.2: Superficies de terres cultivées recevant une fertilisation minérale et des pesticides.....	30
Figure 3.3: Diagramme des classes texturales du sol .....	39
Figure 3.4: Représentation graphique de la distribution des variables PSI et STOT de la couche de surface sur un papier normal .....	48
Figure 3.5: Schéma des méthodes statistiques utilisées pour le regroupement des sols.....	51
Figure 4.1: Solution graphique du test du talus ( <i>scree test</i> ) de Cattell pour déterminer le nombre de composantes interprétables.....	61
Figure 4.2: Représentation des variables dans le plan défini par les deux premières composantes.....	64
Figure 4.3: Représentation des variables dans le plan défini par la première et troisième composantes.....	65
Figure 4.4: Dendrogramme simplifié de la classification hiérarchique des types de sols selon les caractéristiques de la couche de surface .....	66
Figure 4.5: Solution graphique pour déterminer le nombre optimum de groupes.....	66
Figure 4.6: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des types de sols étudiés selon les différents sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique et les textures de surface.....	69
Figure 4.7: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des types de sols	

étudiés selon la nature de l'horizon B et les différents grands groupes taxonomiques. .....	70
Figure 4.8: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des types de sols étudiés selon les deux indices de saturation en P.....	72
Figure 4.9: Teneurs moyennes du P soluble (PW) pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique. ....	74
Figure 4.10: Valeurs moyennes du degré de saturation en P [POX/(ALOX+FEOX)] et [100.PM3/ALM3] pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique.....	74
Figure 4.11: Valeurs moyennes de la capacité de fixation en P déterminées pour chacun des sous-groupes par a) ALM3, b) PSI et c) (ALOX+FEOX).....	75
Figure 4.12: Solution graphique du test du talus ( <i>scree test</i> ) pour déterminer le nombre de composantes interprétables .....	93
Figure 4.13: Représentation des variables dans le plan défini par les deux premières composantes .....	95
Figure 4.14: Dendogramme simplifié obtenu selon la méthode de Ward à partir des pointages des deux premières composantes.....	96
Figure 4.15: Solution graphique pour déterminer le nombre optimum de groupes.....	97
Figure 4.16: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des séries de sols selon les sous-groupes générés par l'analyse de groupement hiérarchique, la texture du sous-sol et la classe calcaire de la famille.....	100
Figure 4.17: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des séries de sols selon la nature de l'horizon B et les différents grands groupes taxonomiques.....	101

Figure 4.18: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des séries de sols selon deux indices de saturation en P. ....	102
Figure 4.19: Teneurs moyennes du P soluble (PW) déterminées pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique. ....	104
Figure 4.20: Valeurs moyennes des indices du degré de saturation en P [POX/(ALOX+FEOX)] et [100.PM3/ALM3] déterminées pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique. ....	104
Figure 4.21: Valeurs moyennes de la capacité de fixation en P déterminées pour chacun des sous-groupes par a) ALM3 b) PSI et c) (ALOX+FEOX). ....	105
Figure 4.22: Solution graphique du test du talus ( <i>scree test</i> ) pour déterminer le nombre de composantes interprétables. ....	117
Figure 4.23: Représentation des variables dans le plan défini par les deux premières composantes. ....	120
Figure 4.24: Dendogramme simplifié obtenu selon la méthode de Ward à partir des pointages des deux premières composantes. ....	121
Figure 4.25: Solution graphique pour déterminer le nombre optimum de groupes. ....	121
Figure 4.26: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des séries de sol selon les sous-groupes générés par l'analyse de groupement hiérarchique, la classe de contenu en calcaire de la famille et la texture du substratum. ....	123
Figure 4.27: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des séries de sols selon les grands groupes taxonomiques, La nature de l'horizon C et l'indice de saturation PSATOX. ....	124
Figure 4.28: Valeurs moyennes de la capacité de fixation en P déterminées pour chacun des sous-groupes par a) ALM3, b) PSI et c) (ALOX+FEOX). ....	126
Figure 4.29: Valeurs moyennes du P soluble (PW) déterminées pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique. ....	127

Figure 4.30: Valeurs moyennes du degré de saturation en P $[POX/(ALOX+FEOX)]$ et $[100.PM3/ALM3]$ déterminées pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique.....	127
Figure A.1: Position géographique des comtés de la région étudiée dans le Québec méridional. ....	155
Figure A.2: Localisation des différentes M.R.C. présentes dans la région agricole de la plaine de Montréal .....	156

## LISTES DES TABLEAUX

---

Tableau 2.1: Grille de référence de fertilisation des prairies et des pâturages.....	21
Tableau 3.1: Superficies des terres en cultures et dénombrement des exploitations de la région à l'étude.	28
Tableau 3.2: Superficies occupées par les grandes cultures céréalières et le maïs-grain.....	28
Tableau 3.3: Superficies occupées par les plantes fourragères et les légumineuses .....	29
Tableau 3.4: Répartition des sols dans les comtés à l'étude.....	35
Tableau 3.5: Liste des indicateurs et méthodes d'analyses dans cette étude.....	38
Tableau 3.6: Différentes catégories de texture de la couche de surface.....	40
Tableau 3.7: Différentes catégories de texture des horizons B et C.....	40
Tableau 3.8: Définition des horizons présents dans le sous-sol et le substratum.....	41
Tableau 3.9: Caractéristiques générales des grands groupes de sol .....	42
Tableau 3.10: Système de classification du contenu en carbonates des sols.....	43
Tableau 3.11: Saturation des sols en phosphore.....	43
Tableau 3.12: Statistiques descriptives de la couche de surface (horizon A).....	45
Tableau 3.13: Statistiques descriptives du sous-sol (horizon B).....	46
Tableau 3.14: Statistiques descriptives du substratum (horizon C).....	47
Tableau 3.15: Liste des variables transformées.....	50
Tableau 4.1: Coefficients de corrélation de Pearson de la couche de surface entre les propriétés du sol et les indicateurs relatifs au phosphore.....	59
Tableau 4.2: Différentes valeurs propres des composantes et pourcentage de la variance expliquée et cumulative.	60
Tableau 4.3: Matrice des saturations des composantes conservées.....	62
Tableau 4.4 : Moyennes et coefficients de variation des 8 sous-groupes dérivés de l'analyse de groupement hiérarchique	76

Tableau 4.5: Résumé des différentes étapes de l'analyse discriminante par étapes réalisée sur les 8 sous-groupes avec l'ensemble des variables.....	81
Tableau 4.6: Caractéristiques des variables incluses dans le modèle de classification effectuées sur l'ensemble des variables .....	82
Tableau 4.7: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 8 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante sur l'ensemble des variables.....	82
Tableau 4.8: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 8 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante sur les variables M3, OX, PW et PSI. ....	85
Tableau 4.9: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 8 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante sur les variables M3 seulement .....	86
Tableau 4.10: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 8 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante sur les variables traditionnelles.....	87
Tableau 4.11: Coefficients de corrélation de Pearson de l'horizon B entre les propriétés du sol et indicateurs relatifs au phosphore.....	91
Tableau 4.12: Les différentes valeurs propres des composantes et le pourcentage de la variance expliquée et cumulative.....	93
Tableau 4.13: Matrice des saturations des composantes conservées.....	94
Tableau 4.14: Moyennes et coefficients de variation des 5 sous-groupes dérivés de l'analyse de groupement hiérarchique.....	106
Tableau 4.15: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante sur l'ensemble des variables.....	109
Tableau 4.16: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante effectuée sur les variables modernes.....	111
Tableau 4.17: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes provenant des variables traditionnelles.....	112
Tableau 4.18: Coefficients de corrélation de Pearson du substratum entre les propriétés du sol et les indicateurs relatifs au phosphore .....	115

Tableau 4.19: Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée et cumulative pour chacune des composantes extraites.....	116
Tableau 4.20: Matrice des saturations des composantes conservées.....	118
Tableau 4.21: Moyennes et coefficients de variation des 5 sous-groupes dérivés de l'analyse de groupement hiérarchique. ....	128
Tableau 4.22: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes	131
Tableau 4.23: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes	132
Tableau 4.24: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes	133
Tableau B.1: Description sommaire des différentes séries sélectionnées de la région étudiée .....	157
Tableau C.1: Représentation des indices d'aplatissement et d'asymétrie des données brutes de la couche de surface et de leurs transformations logarithmiques.....	163
Tableau C.2: Représentation des indices d'aplatissement et d'asymétrie des données brutes et transformées du sous-sol.....	164
Tableau C.3: Représentation des indices d'aplatissement et d'asymétrie des données brutes et transformées du substratum .....	165
Tableau D.1: Groupements de sols de la couche de surface effectués par la méthode de Ward.....	167
Tableau D.2: Résultats de la classification des types de sols effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs modernes.....	168
Tableau D.3: Résultats de la classification des types de sols effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs traditionnels.....	168
Tableau D.4: Classement des sols provenant de l'analyse de groupement hiérarchique modifié par l'analyse discriminante à partir d'indicateurs modernes et traditionnels.....	169
Tableau E.1: Groupements de sols du sous-sol effectués par la méthode de Ward .....	171
Tableau E.2: Résultats de la classification des séries de sols effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs modernes.....	172

Tableau E.3: Résultats de la classification des séries de sols effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs traditionnels.....	172
Tableau E.4: Classement des sols provenant de l'analyse de groupement hiérarchique modifié par l'analyse discriminante à partir d'indicateurs modernes et traditionnels.....	173
Tableau F.1: Groupements de sols du substratum effectués par la méthode de Ward.....	175
Tableau F.2: Résultats de la classification des séries effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs modernes.....	176
Tableau F.3: Résultats de la classification des séries de sols effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs traditionnels.....	176
Tableau F.4: Classement des sols provenant de l'analyse de groupement hiérarchique modifié par l'analyse discriminante à partir d'indicateurs modernes et traditionnels.....	176
Tableau G.1: Classification taxonomique des types de sols sélectionnés des comtés pédologiques du sud-est de la plaine de Montréal. ....	177

# 1. INTRODUCTION

---

Les pratiques de fertilisation des cultures utilisées depuis les deux dernières décennies ont été à l'origine de l'enrichissement des sols en phosphore dans les régions où l'on pratique une agriculture intensive. Le phosphore (P) est un élément nutritif considéré comme problématique au niveau environnemental lorsque sa concentration augmente dans la couche de surface des sols cultivés. Ainsi, l'accroissement de la richesse des sols en P constitue vraisemblablement un risque pour la qualité de l'eau. Dans une perspective de gestion agroenvironnementale rationnelle et efficace, il est primordial de trouver d'autres caractéristiques que le P disponible pour calculer l'apport de fertilisants phosphatés à incorporer au sol pour obtenir un rendement optimal des cultures tout en prévenant le risque de contamination de l'eau de surface par le P. La majorité des grilles de fertilisation actuellement en usage au Québec ne tiennent pas compte des propriétés physico-chimiques des sols comme l'indice de sorption et de désorption en P des sols. Plusieurs caractéristiques prises en compte dans la définition et la délimitation des sols dans les inventaires jouent un rôle dans la prédiction du niveau de disponibilité du P pour la plante et dans l'évaluation des risques de pollution de l'eau par le P.

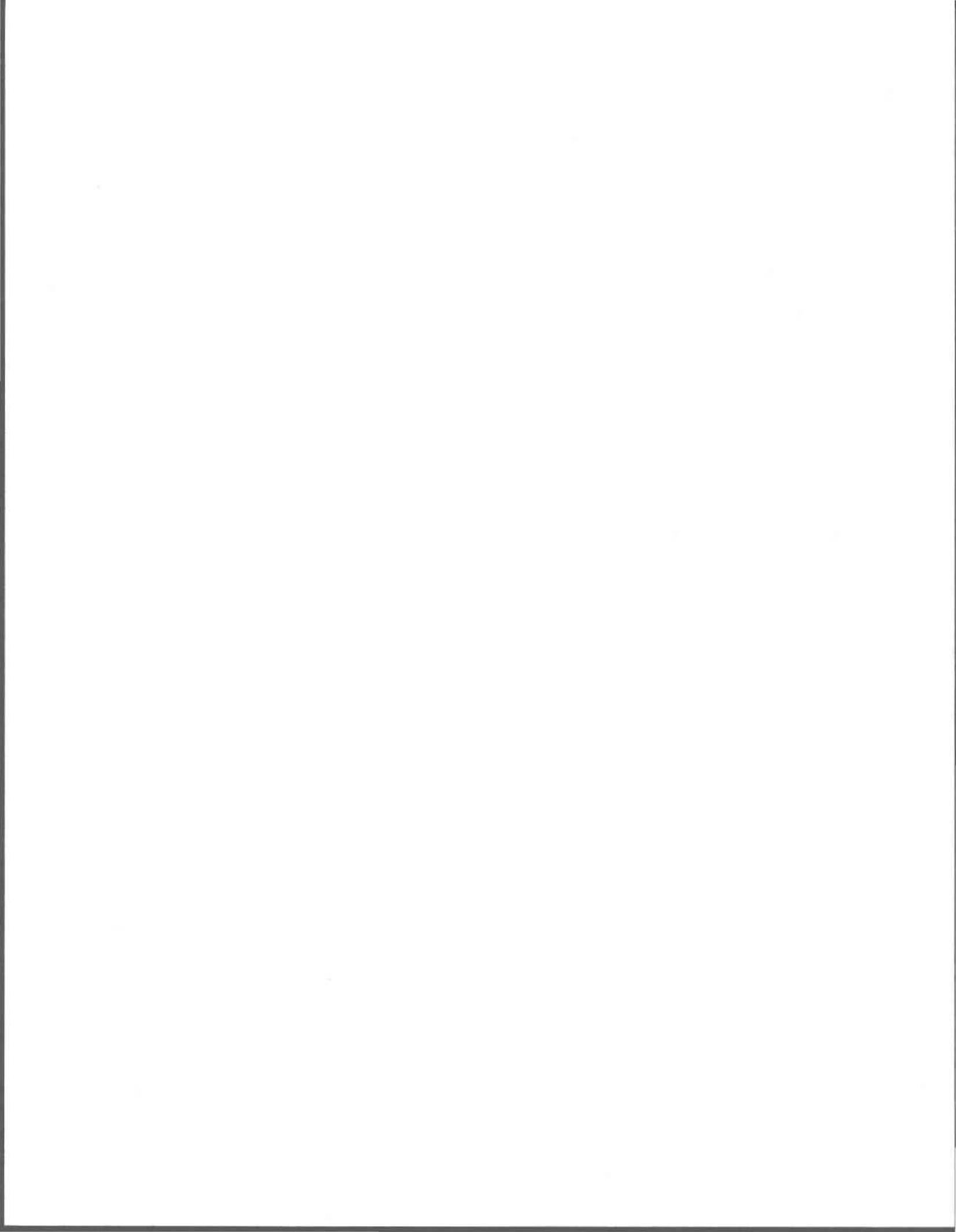
L'hypothèse sous-jacente à cette étude est qu'il est possible, grâce aux techniques d'analyse multivariée appliquées aux caractéristiques physico-chimiques, d'établir un regroupement des sols en classes de comportement distinctes et homogènes quant à leur capacité de fixation en P et leur vulnérabilité intrinsèque à la pollution environnementale par le P.

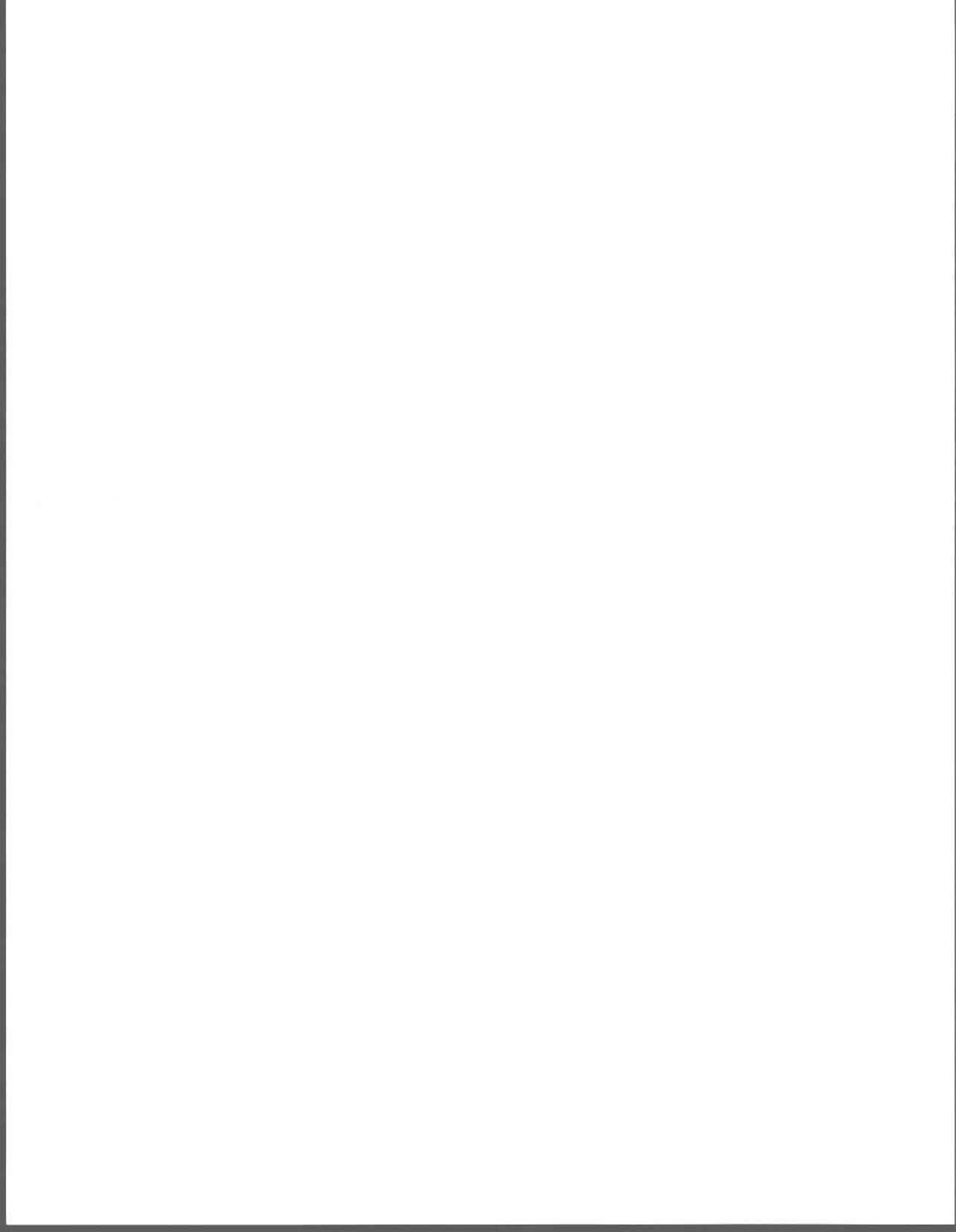
L'objectif général de cette étude est de préciser le concept de vulnérabilité intrinsèque des sols du sud-est de la plaine de Montréal aux pertes en P, en intégrant aux teneurs en P disponibles, les caractéristiques intrinsèques des sols concernés. Ces indicateurs sont actuellement utilisés dans les laboratoires de sol ou disponibles dans les bases de données pédologiques.

Quelques objectifs spécifiques peuvent être énoncés:

- 1) former des groupes de comportement des sols selon leur capacité de fixation en P et leur niveau de fertilité,
- 2) interpréter les regroupements quant à leur vulnérabilité à la pollution par le P,
- 3) proposer une équation de classification pour chacun des groupes et
- 4) établir un modèle généralisé simplifié de classification des sols du sud-est de la plaine de Montréal selon leur capacité de fixation en P.

Le deuxième chapitre de ce travail présente la problématique environnementale liée au P en milieu agricole et les différents indicateurs de sols reliés à l'état du phosphore dans le sol. Le troisième chapitre traite, quand à lui, de la démarche méthodologique. Les résultats et interprétations sur le regroupement des sols sont présentés dans le quatrième chapitre, suivi d'un modèle généralisé simplifié sur la capacité de fixation des sols du sud-est de la plaine de Montréal.





## 2. REVUE DE LITTÉRATURE

---

### 2.1 Problématique du phosphore au Québec

Depuis quelques années, on a commencé à observer un accroissement marqué de la teneur en phosphore dans plusieurs sols agricoles du Québec. Le même problème a également été constaté dans l'eau des rivières des bassins à vocation agricole. Ces observations soulèvent actuellement plusieurs interrogations sur les causes et les risques associés à ces phénomènes [Giroux et *al.*, 1996].

Le mode de gestion des engrais de ferme et les pratiques de fertilisation des cultures, couramment utilisés durant les deux dernières décennies, ont été à l'origine de l'enrichissement des sols en phosphore. Cet enrichissement se retrouve dans des zones particulières du Québec, plus spécialement dans les régions où l'on a pratiqué une agriculture intensive [Tabi et *al.*, 1990]. La grande concentration des animaux d'élevage, l'utilisation plus généralisée et plus importante des engrais minéraux ont ainsi contribué à l'industrialisation de l'exploitation agricole [Bouchard et *al.*, 1987]. La tendance à l'industrialisation a contribué à l'émergence de problèmes environnementaux relatifs au phosphore; surtout dans les régions à surplus d'engrais de ferme et dans les zones de cultures de maïs [Simard et *al.*, 1994; Simard et *al.*, 1995]. Au Québec, la culture du maïs est située principalement au sud de Montréal, occupant une grande étendue des bassins des rivières Yamaska, Richelieu et Châteauguay et une superficie appréciable dans les bassins des rivières Saint-François, Nicolet et Bécancour. Cette culture est aussi présente sur la rive nord du Saint-Laurent, notamment dans les bassins des rivières l'Assomption, Mascouche, Bayonne et Maskinongé [Ministère de l'Environnement et de la Faune (MEF), 1995]. Ces régions sont donc considérées comme des zones à risque pour l'équilibre du milieu aquatique.

## 2.2 La pollution diffuse et ponctuelle

Il existe deux formes de pollution dans les cours d'eau: la pollution diffuse et la pollution ponctuelle. Les sources ponctuelles sont généralement assez massives en termes de volume et de charge polluante, et leurs effets sur la qualité du milieu sont immédiats; la provenance de ces polluants d'origine urbaine ou industrielle est généralement facilement identifiable. En région agricole, les rejets ponctuels sont principalement associés aux sites d'entreposage des fumiers et des lisiers, ainsi qu'à l'accès des animaux aux cours d'eau. Le contrôle des sources d'origine ponctuelle ne semble pas représenter d'obstacles techniques majeurs. En ce qui a trait aux sources diffuses de pollution par le P, elles sont produites par le ruissellement de surface et sont majoritairement d'origine agricole. La contribution de ces sources est donc directement reliée aux épisodes hydrologiques. Les polluants d'origine diffuse atteignent les eaux de surface après un transit terrestre plus au moins complexe et long. Les sources diffuses sont difficilement localisables et sont réparties sur l'ensemble du territoire. Ces sources sont moins dommageables, parce que le volume individuel de polluants est beaucoup moins important. Par contre, l'addition de chacune d'elles, entraîne une amplification de la pollution de l'amont vers l'aval des cours d'eau [Bernard, 1991].

Une étude, se rapportant à la qualité des eaux du bassin de la rivière l'Assomption, a donné un exemple de l'influence des systèmes d'entreposage des fumiers sur le taux de phosphore dans la rivière Achigan. Les flux moyens du phosphore sont passés de 4,5 à 2 kg P par hectares cultivés de 1980 à 1983, période où la plupart des structures d'entreposages de lisiers ont été aménagées. Sur ce même bassin, on a estimé qu'environ 82 % du phosphore présent dans la rivière serait d'origine agricole [Simoneau et Grimard, 1989]. Dans la région de Montréal, on a estimé que 75 % des 650 tonnes de phosphore qui ont été exportées à l'embouchure de la rivière Yamaska, pourraient être d'origine agricole. Le flux moyen annuel de phosphore, après élimination des autres sources, a été estimé à 2,2 kg/ha pour une terre en culture [Primeau et Grimard, 1989]. Pour sa part, Vollenweider (1968) avait observé des flux en rivière de 2 à 3 kg P/ha-an pour des bassins versants en culture et

de l'ordre de 0,5 kg/ha-an pour des zones herbacées. Dans les rapports traitant des bassins versants et publiés par le MEF, les concentrations en P total par les zones forestières sont minimales et se situent dans l'ordre de 0,012 à 0,027 mg/l. Ces rapports, dans leur conclusion, suggèrent qu'une des causes principales de dépassement de la norme de phosphore est d'origine agricole et que, dans plusieurs rivières telles que la Richelieu et la Yamaska, les concentrations en phosphore ont continué à s'accroître malgré la nette diminution de phosphore provenant des autres sources. Il est rapporté que, dans certaines rivières situées dans une zone agricole donnée, 100 % des échantillons d'analyse d'eau dépassaient le critère établi à 0,03 mg/l pour la vie aquatique. Certains tronçons agricoles, comme la rivière des Hurons, ont atteint des moyennes annuelles de l'ordre de 0,7 mg/l de contenu en phosphore [Bernier *et al.*, 1996].

### 2.3 Fertilisation à long terme des sols

Une augmentation du phosphore dans la couche de surface, causée par une balance positive entre les apports et les prélèvements des cultures de ces sols sur une longue période, a été observée dans les régions agricoles [Tabi *et al.*, 1990]. Les zones plus vulnérables sont constituées particulièrement des sols ayant reçu de forts apports en fertilisants organiques ou inorganiques et présentant une faible capacité de fixation du phosphore, une nappe d'eau élevée et une faible capacité de rétention de l'eau par le sol [Behrendt et Boekhold, 1993]. Il faut indiquer que les coefficients d'efficacité du P des engrais de ferme étaient plus faibles (20%) avant 1992 que ceux utilisés actuellement (65 à 80%). Dans un passé récent, les agriculteurs comptabilisaient peu les ajouts de P provenant des engrais de ferme épandus [Giroux *et al.*, 1996]. Le P s'accumulait alors dans le sol chaque fois que les quantités appliquées dépassaient celles exportées par les récoltes [McCallister *et al.*, 1987; Peck *et al.*, 1971; Giroux et Tran, 1994; Tran et N'dayegamiye, 1995]. Dans la pratique agricole, les doses d'application des engrais de ferme sont souvent calculées pour combler les besoins en azote de la culture, sans vraiment considérer les besoins en phosphore [Tran et N'dayegamiye, 1995]. Il faut savoir que les exportations annuelles en P d'une culture de maïs-grain au Québec varient entre 40 et 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Les pratiques de fertilisation de

cette culture ont souvent fait état de doses annuelles appliquées de 40 à 100 kg  $P_2O_5$ /ha sous forme de fertilisants minéraux ou de 100 à 225 kg  $P_2O_5$  /ha sous forme de lisier de porcs [Giroux et *al.*, 1996]. Les quantités de phosphore apportées par les fumiers ou les lisiers, excédant les prélèvements en phosphore de la plante, causent ainsi une accumulation du P dans le sol. Il a été constaté que la quantité de P plus soluble, exportée par le maïs-ensilage correspond à seulement 1/5 à 1/7 de l'exportation en azote. Pour le fumier de bovins et les lisiers de porcs, 21% du P-total s'est retrouvé dans le sol sous une forme résiduelle, disponible à la plante et récupérable par l'extractif Mehlich III. Le reste du P présent dans le sol a été en partie transformé en des formes non disponible [Tran et N'dayegamiye, 1995].

L'utilisation de doses excessives d'engrais minéraux phosphatés pendant plusieurs années a également provoqué des accumulations de P dans les sols de zones de culture intensive de maïs [Tabi et *al.*, 1990]. Quand le P s'accumule à la suite d'une surfertilisation, la concentration du phosphore désorbable augmente. Le risque de perte de ce dernier par érosion, par ruissellement ou écoulement hypodermique est alors plus élevé [Sharpley, 1995]. Kingery et *al.* (1994) ont observé un lessivage du P jusqu'à une profondeur de 60 cm dans un pâturage de graminées du nord de l'Alabama; ces terres avaient reçu des applications répétées de fumier de poulets, l'une sur une période de 15 ans et l'autre sur 28 ans. Ils ont observé des concentrations plus grandes en P (35 à 230 mg/kg) dans les 45 premiers centimètres de sol. De plus, le contenu en P obtenu à partir de l'extractif Mehlich I a présenté des concentrations extrêmement élevées en surface, environ 230 mg/kg, alors que la concentration correspondant au rendement agronomique optimal de cette région était de 25 mg/kg [Cope et *al.*, 1981]. Schwab et Kulyingyong (1989) ont évalué à l'aide de la méthode Bray 1, sur une culture de graminée, les changements du taux de phosphore d'un loam sableux du Kansas. L'échantillonnage a été effectué sur une période de 40 ans de fertilisation continue avec des superphosphates (940 kg P/ha). La fertilisation continue a induit des valeurs de 350mg/kg pour l'horizon de surface, par rapport à 13 mg/kg pour un sol non fertilisé; les concentrations relevées à des profondeurs de 30, 60 et 90 cm étaient de

56, 10 et 3 mg/kg pour une fertilisation continue, par opposition à des concentrations de 3, 2 et 2 mg/kg pour les sols témoins.

## 2.4 Effets sur les milieux aquatiques

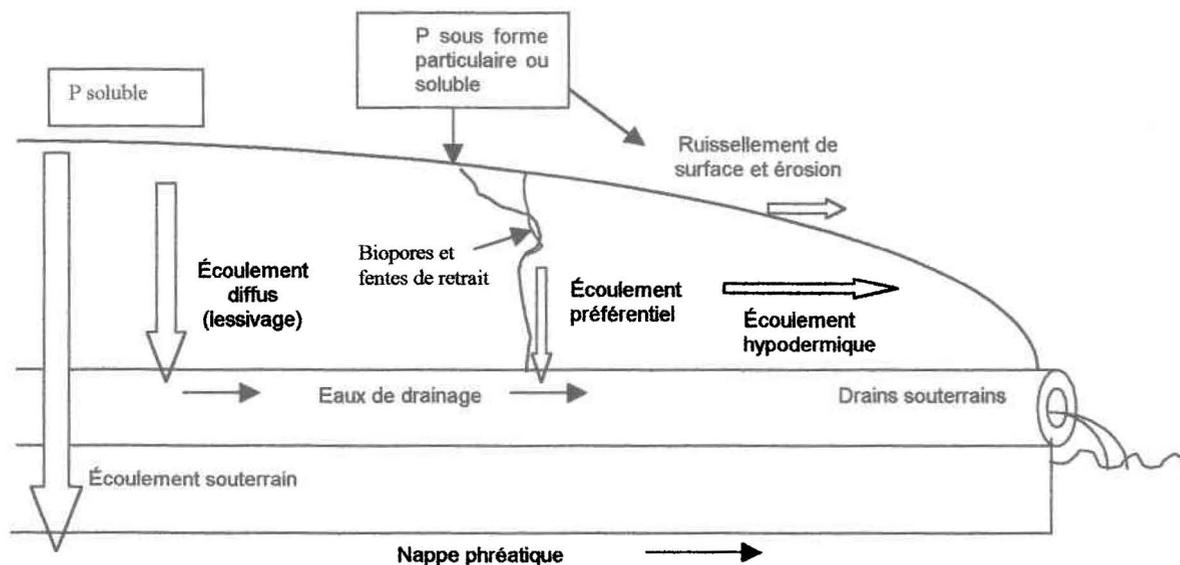
La contamination des eaux de surface par le phosphore est en voie de devenir un problème de taille au Québec. Il contribue à la détérioration de l'état des cours d'eau dans les zones de cultures et de productions animales intensives [Sharpley et Rekolainen, 1997]. Le phosphore agit, en général, comme le facteur limitatif à la multiplication des plantes aquatiques [Mackenthun, 1965]. En effet, la capacité d'une rivière à assimiler le phosphore est très limitée. Le ruissellement de surface du P vers un cours d'eau entraîne des bouleversements dans l'écosystème de celui-ci, altère, entre autres, sa qualité et affecte la vie aquatique et son utilisation pour des activités récréatives [Painchaud, 1997]. Des études effectuées sur plusieurs rivières du Québec ont montré que les teneurs en P excèdent très souvent le niveau critique établi à 0,03 mg P/l [Simoneau 1991 et 1996; Primeau et Grimard 1989 et 1992; Robitaille, 1994]. La qualité de l'eau est détériorée par la présence accrue d'algues flottantes, de matières en suspension, d'odeurs, de matières colorantes et de toxines. Les poissons sont également affectés par la réduction en O<sub>2</sub> de l'eau originant de la prolifération excessive des algues qui induit l'anoxie du milieu [Clark, 1989]

Il y a plus de 25 ans, Ryden *et al.* (1973), dans un compte rendu sur des recherches portant sur les sols et les facteurs contrôlant la perte de P des bassins versants agricoles et forestiers, ainsi que sur l'intensité du ruissellement en milieu urbain, ont établi que le P retrouvé dans les eaux de surface était le principal facteur contrôlant l'eutrophisation de l'eau douce [Sharpley et Halvorson, 1994]. De plus, l'estimation des apports relatifs des différentes sources de P aux eaux de surface est d'une grande importance pour prévenir et contrôler l'eutrophisation. Cette problématique semble donc essentiellement liée aux bassins agricoles [Baril *et al.*, 1996].

## 2.5 Mouvement du phosphore

Plusieurs études soutiennent que les pertes de phosphore se produisent principalement par érosion [Sharpley et Halvorson, 1994] ou par ruissellement de surface [Stamm et *al.*, 1998]. Ces phénomènes complexes sont conditionnés par de nombreux éléments tels que l'intensité des précipitations, la topographie, les conditions du sol et les pratiques culturales. Le P fixé aux particules érodées de sol représente une grande proportion du P transporté. On retrouve aussi du P sous forme soluble (dissoute) dans les eaux de ruissellement, surtout sous forme d'orthophosphates. Ces formes de P sont rapidement assimilables par les algues [Peter, 1981; Walton et Lee, 1972]. La perte par lessivage du P a été souvent moins prise en considération dans le phénomène d'eutrophisation [Sharpley et Menzel, 1987]. La figure 2.1 illustre les différents types de mouvement du phosphore présent dans un profil de sol.

En général, les sols minéraux possèdent une forte fixation du phosphore qui résulte en de faibles concentrations de P dans la solution du sol [McBride, 1994]. Le mouvement vertical du P peut toutefois augmenter [Sharpley et Halvorson, 1994] spécialement dans les eaux de drainage (drains agricoles) puisque l'infiltration de l'eau et la percolation dans le sol sont normalement augmentées par le système de drains souterrains. Cependant, la concentration du phosphore dans les eaux de drainage est généralement plus faible que celle issue du ruissellement de surface [Ryden et *al.*, 1973; Sharpley et Halvorson, 1994].



Adapté: Sharpley *et al.* (1993)

Figure 2.1: Différentes formes de transport du P vers les eaux de surface

On a observé une élévation du risque de désorption du P et de lessivage par le système de drainage souterrain quand un certain degré de saturation est atteint. Cette vulnérabilité semble atteinte lorsque les sols présentent des taux de saturation variant de 20 % à 30% selon l'indice utilisé [Giroux *et al.*, 1996]. Ce phénomène de désorption associé au taux de saturation élevée, résulte d'une diminution de la capacité de fixation du P dans les horizons de surface des sols fertilisés durant de longues périodes et peut ainsi conduire à une migration du P vers le bas du profil [Heckrath *et al.*, 1995; Beauchemin *et al.*, 1996 et 1998]. Breeuwsma et Reijerink (1992) ont estimé que 87 % de la contamination par le phosphore provenait du lessivage du P dans des sols sableux provenant de bassins à forte concentration agricole et caractérisés par une topographie plane. D'autres chercheurs ont remarqué que la migration du phosphore dans le profil de sol semblait grandement réduit lorsque celui-ci avait une texture fine et possédait une forte concentration d'aluminium [Sims *et al.*, 1998]. Cependant, les sols argileux peuvent se montrer vulnérables aux pertes en P à travers le profil en raison des possibilités d'écoulement préférentiel par les fentes de retrait en saison sèche ou par les biopores. Les sols argileux de pente faible présentant une

fertilité moyenne en phosphore, peuvent être particulièrement susceptibles d'excéder les normes de qualité de l'eau dans les drains agricoles, lorsqu'une pluie importante vient interrompre une période sèche [Beauchemin et *al.*, 1998]. De récentes études portant sur les sols à texture fine ont suggéré que sous ces conditions, l'écoulement préférentiel des eaux de drainage pourrait contribuer de façon non négligeable aux pertes de P dans l'eau de drainage [Beauchemin et *al.*, 1998; Heckrath et *al.*, 1995; Simoneau, 1996]. Or, les sols des Basses-Terres du St-Laurent ont généralement de faibles pentes, sont pauvrement drainés et sont principalement formés d'argiles de type vermiculite [Simard et *al.*, 1991]. L'ensemble de ces facteurs peut expliquer les propriétés verticales telles que le fendillement durant les périodes où l'évapotranspiration excède les précipitations [Lamontagne et Cossette, 1994]. Ces fentes peuvent avoir plus de 1-2 cm de largeur et peuvent s'étendre jusqu'aux horizons de sol où sont localisés les drains [De Kimpe et Laverdière, 1980; Simard et *al.*, 1989].

Le lessivage du phosphore [Gangbazo et *al.*, 1997; Heckrath et *al.*, 1995; Culley et *al.*, 1983] a aussi été rapporté dans des sols organiques ainsi que dans les sols minéraux possédant une texture sableuse avec un taux élevé de matière organique, vraisemblablement parce qu'ils contenaient une faible concentration des constituants primaires, responsables de la fixation du phosphore tels que l'argile, les oxydes de fer et d'aluminium et les carbonates [Humphreys et Pritchett, 1971]. Cogger et Duxbury (1984) ont évalué que 44 % des fertilisants appliqués et le phosphore minéralisé peuvent être entraînés par lessivage dans un sol organique cultivé, profond et possédant un faible contenu en (Al+Fe) total (0,84 %). Tandis que pour un sol organique peu profond présentant un plus grand contenu en (Al+Fe) total (1,9 %), 2 % des fertilisants appliqués et phosphore minéralisé peuvent être entraîné par lessivage. À partir de ces résultats, ils ont suggéré que le contenu en sesquioxydes (Al+Fe) constituait le meilleur moyen pour prédire l'intensité du lessivage du phosphore dans les sols organiques dans la région de New York. On a observé que ce mouvement est accentué dans les sols lorsqu'ils sont fortement fertilisés [Sharpley et Halvorson, 1994]. Pour réduire le mouvement du P, à l'intérieur d'un

bassin versant, Sharpley et *al.*(1993) préconisent comme stratégie d'identifier de prime abord les sources ou zones vulnérables afin d'y concentrer les interventions.

## 2.6 Indicateurs relatifs au phosphore

### 2.6.1 Capacité de fixation des sols

La capacité de fixation du P des sols est un indicateur environnemental fiable pour déterminer les risques associés à l'état du P dans les sols [Giroux et Tran, 1996]. La capacité de fixation est définie comme le pouvoir d'un sol à retenir une quantité de P donnée selon divers mécanismes physico-chimiques (adsorption, fixation, précipitation) [Bolinder et *al.*, 1998].

Pour évaluer la capacité de fixation, on peut utiliser la méthode classique des isothermes de Langmuir [Dalal et Hallsworth, 1976]. Cette méthode, quoique souvent critiquée, a été grandement utilisée pour décrire la capacité de fixation dans les sols [Mehadi et Taylor, 1988; Taylor et *al.*, 1996]. Les résultats d'une étude conduite sur 42 sols agricoles du Québec ont indiqué que la capacité maximale de fixation en P, telle qu'établie par la méthode des isothermes de Langmuir, variait entre 400 et 4200 mg P/kg de sol sec [Giroux et Tran, 1985]. Une alternative à cette méthode longue et fastidieuse est l'emploi de l'isotherme à un point [Bache et Williams, 1971]. La détermination de cet indice de fixation (PSI) est basée sur l'addition d'une quantité connue de P dans un sol et permet de mesurer à l'équilibre la quantité de phosphore fixé avec une bonne précision. Cet indice défini par  $X/\log C$  est établi par le rapport entre la quantité de P fixé (X) sur le logarithmique de la concentration de P à l'équilibre (C). Mozaffari et Sims (1994) ainsi que Simard et *al.* (1994) ont démontré que l'indice de fixation proposé par Bache et Williams (1971) était un outil fiable pour classer divers sols selon leur capacité à fixer le P. La capacité de fixation du sol en P peut aussi être sommairement estimée par les teneurs en Fe et Al extractibles à l'oxalate d'ammonium [Ballard et Fiskell, 1974; Saunders, 1965; Yuan et Breland, 1969; Van der Zee et Van Riemsdijk, 1986; Simard et *al.*, 1994]. Une autre

façon, un peu moins précise, de déterminer avec plus de facilité la capacité de fixation en P des sols, est l'utilisation de la teneur en aluminium extrait avec Mehlich III (ALM3) [Giroux et Tran, 1996].

Selon la nature du sol et des horizons le caractérisant, le paramètre de fixation est relié à des caractéristiques de sols particulières. La fixation du phosphore d'un sol est entre autres reliée à la teneur en argile [Sims et *al.*, 1998], particulièrement dans les sols très altérés [Sharpley et *al.*, 1989]. Elle est particulièrement reliée à la teneur en fer et en aluminium libres dans les sols [Evans et Smillie, 1976; Giroux et Tran, 1985; Simard et Lapierre, 1990] et plus spécifiquement dans les sols sableux non calcaires [Loveland et *al.* 1983; Schoumans et *al.*, 1987; Van der Zee et *al.*, 1987 et 1988; Van der Zee et Van Riemsdijk, 1988]. D'autres chercheurs ont rapporté que les oxydes de fer et d'aluminium et la fixation du phosphore provenant d'échantillons de sols gleysoliques étaient corrélés avec le pH du sol. Ce phénomène semble attribuable à une augmentation de l'activité des formes amorphes d'hydroxydes d'aluminium ou de fer avec le pH [Mokwunye, 1975]. La capacité de fixation est aussi reliée au contenu en carbone organique et à la matière organique [Sims et *al.*, 1998]. Cette mesure a de plus montré une forte relation avec le contenu en carbonates dans les sols calcaires [Sharpley et *al.*, 1989; Brar et Cox, 1991]. La valeur de la fixation en P varie selon les propriétés des différents horizons d'un profil de sol. Simard et *al.* (1994) ont constaté que le paramètre de fixation était relié au carbone organique, au phosphore extrait par Mehlich III (PM3) et au fer et à l'aluminium extraits par l'oxalate d'ammonium (FEOX, ALOX) dans l'horizon A, au PM3, ALOX et au contenu en sable dans l'horizon B et au carbone organique ainsi qu'à ALOX dans l'horizon C. Une autre étude effectuée sur un bassin versant du lac Okeechobee en Floride a montré que les horizons Bh et Bw d'un spodosol avaient une plus grande affinité pour la fixation du phosphore à cause, entre autres de la présence de matière organique et d'oxyde de fer et d'aluminium [Mansell et *al.*, 1991]. Par contre, l'horizon de surface était caractérisé par une texture sableuse et une faible capacité de fixation. Donc, le P dissous de l'horizon de

surface pouvait être lessivé et être retenu par les horizons sous-jacents, Bh et Bw [Nair et *al.*, 1998].

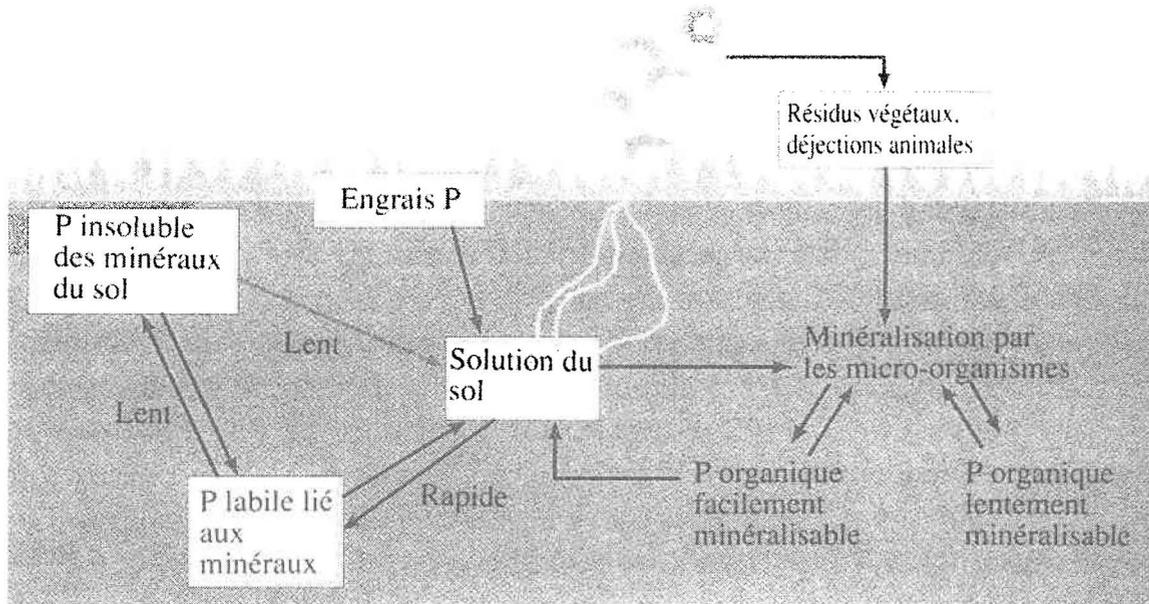
Des recherches récentes [Giroux et Tran, 1996; Simard et *al.*, 1994] ont rapporté que la solubilité du P du sol et sa désorption variaient en proportion inverse avec la capacité de fixation en P des sols. On a constaté aussi que la mesure de PSI diminuait lorsqu'il y avait l'application de fumiers, lisiers ou de fertilisants commerciaux [Sharpley et *al.*, 1984].

### **2.6.2 La solubilité, la disponibilité et la désorption du phosphore du sol**

La disponibilité en P est fonction de la présence de formes labiles de phosphore dissoutes dans l'eau et absorbées sur les particules du sol, principalement sur les argiles. Donc, lorsqu'il se produit un enrichissement de la teneur en P disponible, l'équilibre sol-solution est perturbé. Ceci résulte en un accroissement du phosphore dans la solution du sol. Cette augmentation de la solubilité du P peut être bénéfique aux cultures en favorisant l'absorption de P et en réduisant les besoins en engrais phosphatés [Giroux et Tran, 1996]. Certains chercheurs ont indiqué qu'une richesse excessive et une forte solubilité du P peuvent accroître les pertes de phosphore vers les eaux de surface ou de drainage [Heckrath et *al.*, 1995; Sharpley, 1995; Sharpley et *al.*, 1996]. La figure 2.2 montre les différentes formes de phosphore présentes dans le sol.

Les analyses de sol utilisées pour représenter le niveau d'enrichissement des sols agricoles en formes labiles, soit le P soluble à l'eau (PW) et le P extractible par la solution de Mehlich III (PM3), se sont révélées de bons indicateurs de fertilité [Simard et *al.*, 1994 et 1995]. La méthode de Bray-2 est également susceptible d'être un indicateur potentiel de P désorbable dans le sol [Gartley et Sims, 1994]. Simard et *al.* (1994) ont montré que le PM3 combiné à d'autres propriétés de sols (pH, matière organique et le calcium échangeable dans l'horizon A), peut permettre de prédire l'intensité de la désorption du P dans les sols du bassin versant de la rivière Beaurivage. Ils ont de plus constaté que la mesure du Pw était reliée au pH, au magnésium, au carbone organique, M3P et au calcium échangeable

dans l'horizon A, au sable et M3P dans l'horizon B, et aussi au pH, PM3 et FEOX dans l'horizon C [Simard et al., 1994]. Hartikainen (1991) a aussi observé que le contenu en PW augmente avec l'addition de fertilisants.



Source: Bockman et al. (1990)

Figure 2.2: Relations entre les différentes formes de phosphore dans le sol

Les teneurs en oxydes de fer et d'aluminium libres extraits à l'oxalate d'ammonium, en plus d'être des facteurs importants pour estimer la capacité de fixation du P, peuvent aussi expliquer la disponibilité en P pour les cultures au Québec [Giroux et Tran, 1985]. Le rapport entre le P disponible (PM3) et la capacité de fixation du P (isotherme de Langmuir), est un bon indice très valable pour expliquer la solubilité et la désorption du P du sol, il est par conséquent un indicateur environnemental fiable pour déterminer les risques associés à l'état de saturation en P des sols [Sharpley, 1995; Giroux et Tran, 1996].

### 2.1.1 Effet à long terme: saturation des sols en phosphore

On a longtemps cru par ailleurs qu'il y avait peu de risques environnementaux liés à l'épandage des engrais phosphatés étant donné que les sols ont une grande capacité à fixer

cet élément. Seule l'érosion semblait pouvoir entraîner le P vers les cours d'eau. Le contrôle des pertes de P dans l'environnement s'est donc essentiellement concentré sur les méthodes de conservation des sols destinées à réduire l'érosion. Or depuis quelques années les résultats de recherches ont démontré que l'érosion n'est pas l'unique mécanisme de transport du P et qu'il existe un potentiel de migration par lessivage coïncidant avec l'augmentation du niveau de saturation de la couche supérieure des sols [Breeuwsma et Reijerink, 1992 ;Beauchemin et *al.*, 1998]. La saturation en P du sol est définie comme le pourcentage des sites de fixation déjà occupés par le P dans le sol [Giroux et *al.*, 1996]. La saturation en phosphore d'un sol peut aussi être définie comme le rapport entre le phosphore extractible et la capacité maximale de fixation du phosphore [Sharpley, 1995]. Van der Zee et *al.* (1988) ont proposé l'indice de saturation en phosphore  $POX/(FEOX+ALOX)$ , où POX représente la quantité de P sorbé par le sol ( $\text{mmol kg}^{-1}$ ) et est déterminée par la quantité de P extractible à l'oxalate d'ammonium. Le terme du dénominateur indique la capacité maximale de rétention du sol en P telle qu'estimée par la quantité de fer et d'aluminium extraits à l'oxalate d'ammonium ( $\text{mmol kg}^{-1}$ ). Les rapports  $PM3/ALM3$  [Giroux et *al.*, 1996] et  $PM3/X_m$  où  $X_m$  est égale à la capacité de fixation du P estimée par les isothermes de Langmuir [Sharpley, 1995], ont aussi été proposés comme indices de saturation. Ces deux indices sont fortement reliés entre eux ( $r=0.98^{**}$ ) et le rapport de  $PM3/ALM3$  est celui qui peut être obtenu le plus facilement à partir des analyses de sols réalisées dans les laboratoires du Québec [Giroux et Tran, 1996].

L'excédent de P peut s'accumuler dans un sol et atteindre à long terme des niveaux excessifs, qui ont peu d'influence sur la qualité des récoltes, mais accroît la teneur en P dans les eaux de drainage et de ruissellement [Vivekanandan et Fixen, 1990; Laperrière 1990; Giroux et *al.*, 1996]. En Hollande, les politiques environnementales (DUTCH) ont incorporé le concept de degré critique de saturation en P définie comme le pourcentage de saturation ne devant pas excéder un certain niveau pour empêcher une détérioration de la qualité de l'eau souterraine [Breeuwsma et *al.*, 1995]. Ce niveau critique de saturation varie selon la norme de qualité des eaux retenue. Les recherches de Breeuwsma et Silva

(1992), en Hollande, indiquaient que lorsque 25 % de la capacité maximale de saturation en P du sol évaluée à partir de l'indice  $POX/(ALOX+FEOX)$  était atteinte, la concentration de l'eau souterraine pouvait dépasser 0,1 mg P- $PO_4/l$  dans la nappe phréatique (hauteur moyenne la plus élevée). En Hollande, 88 % des sols sous culture de maïs et 69 % des sols cultivés en prairies et pâturages, ont été déclarés saturés en phosphore pour une valeur critique de 25 % [Breeuwsma et Silva, 1992]. Ces sols ont été traditionnellement surfertilisés, surtout à cause de l'apport de grandes quantités de lisier. Au Québec, la limite permise de P dans l'eau de surface est de 0,03 mg/l (MEF, 1993). De Smet et *al.* (1996) et Lookman et *al.* (1995) utilisent une valeur critique de 25% pour le rapport  $POX/0.5(ALOX+FEOX)$ , ce qui revient à environ 12% pour  $POX/(ALOX+FEOX)$ . Le critère de qualité des eaux de surface du Québec (0.03 mg/l) étant plus sévère que la valeur hollandaise de 0,1 mg P- $PO_4/l$ , si on appliquait la norme de qualité des eaux de surface aux eaux de surface aux eaux de drainage, la valeur critique estimée du  $POX/(ALOX+FEOX)$  serait < 12% (Beauchemin, communication personnelle).

Des travaux récents de recherches menés aux États-Unis et au Québec ont permis d'établir la fiabilité du rapport  $PM3/Xm$  comme indicateur environnemental pour établir notamment la désorption et la solubilité de P dans les sols [Sharpley, 1995; Giroux et Tran, 1996]. Un taux de saturation supérieure à 10 %, avec cet indice, est considéré comme élevé et peut provoquer une dissolution de P supérieur à 250  $\mu g P/l$  [Sharpley, 1995]. Un taux de saturation supérieur à 20 % peut conduire à plus long terme à une mobilité du P dans le sol et éventuellement vers les drains [Sharpley, 1995]. Les recherches réalisées au Québec sur l'état de la saturation en P des sols en sont à leur tout début. Dans la plupart des cas, la valeur de saturation en P ne dépasse pas 10 %, lorsqu'une bonne régie des engrais a été faite. Dans les zones d'agriculture et d'élevage intensifs, les niveaux de saturation peuvent facilement dépasser 20 %, ce qui est considéré comme excessif sur le plan de la désorption, de la solubilité et des risques conséquents de mobilité du P dans les sols [Giroux et Tran, 1996].

Lookman et *al.* (1995) ont appliqué le concept du degré de saturation, exprimé par le rapport  $POX/0.5(FEOX+ALOX)$ , à une région de 700 km<sup>2</sup> dans le nord de la Belgique. Les applications annuelles de fumiers représentaient de 65 à 150 kg/ha de P excédant ainsi les besoins de la culture estimés à environ 30 kg/ha. Les superficies en culture étaient principalement composées de prairies de graminées et servaient à l'élevage intensif d'animaux. En se basant sur un taux de saturation critique de 25 %, ils ont estimé que plus de 75 % des sols étaient saturés. Les taux de saturation moyens pour les terres cultivées en maïs et les prairies, étaient de 43 % et 35 % respectivement. Dans une étude subséquente effectuée sur les mêmes sols, Lookman et *al.* (1996) ont montré que le taux de saturation en P à une profondeur de 0-30 cm était grandement corrélé avec PW ( $r^2=0.78^{***}$ ) contribuant ainsi au potentiel de perte de phosphore par lessivage ou ruissellement.

Par ailleurs, le degré de saturation du sol en P devrait dans l'avenir être rendue disponible avec les résultats d'analyse de sol. Celle-ci permettrait de mieux cibler les champs présentant un risque réel pour la qualité de l'eau et le cas échéant, de mettre en œuvre une stratégie appropriée de réduction des pertes en P [Bernier et *al.*, 1996].

## 2.7 Recommandations de fertilisants

Des chercheurs ont conclu que l'augmentation de la saturation en P ne peut pas toujours être prévenue par l'emploi de fertilisants même en suivant les grilles de référence en fertilisation. Les sols ayant une faible fertilité naturelle requièrent une plus grande quantité de P pour obtenir le niveau de P désiré. De plus, une quantité supplémentaire est nécessaire pour contrôler ce niveau souhaité [Breeuwsma et *al.*, 1995]. L'augmentation de la teneur en P est, d'un point de vue agronomique, souhaitable puisque la plupart des sols du Québec sont originalement considérés comme pauvres en cet élément. Cette façon de faire, compte tenu du fait que le P est un élément peu mobile et bien retenu dans le sol, crée un facteur d'enrichissement, élève le niveau de fertilité en P du sol et réduit à long terme le besoin en engrais P des cultures [Giroux et *al.*, 1996]. Ces compensations peuvent entraîner malgré tout un lessivage du P dans le profil et vers les eaux de drainage souterrain et excéder la

norme environnementale acceptable. Dans les régions sensibles, la concentration de P dans les eaux souterraines et de surface peut augmenter à long terme, même sous de bonnes pratiques culturales [Breeuwsma et *al.*, 1995].

Une étude conduite dans plusieurs provinces canadiennes et états américains a montré que 50 % des sols américains, 48 % des sols ontariens et 59 % des sols de la Colombie-Britannique, présentaient des concentrations allant de "riches" à "excessivement riches" [Sims, 1993]. L'étude de Giroux et Tran (1994) rapporte que plus de 300 000 hectares au Québec sont considérés comme "riches" à "excessivement riches" en phosphore par rapport aux besoins des cultures. La capacité de stockage des sols en P a donc ses limites et il faut modifier les doses d'application lorsque la saturation en P atteint des niveaux trop élevés. Le concept de redressement du niveau de fertilité et les recommandations d'engrais de ferme basées uniquement sur l'azote doivent être revues si les sols sont riches et lorsque le niveau de saturation en P devient trop élevé [Giroux et *al.*, 1996]. De plus, McCollum (1991) a démontré que le rendement des plantes plafonnait lorsqu'un certain niveau de phosphore extractible, selon la méthode de Mehlich III, était atteint. Ces informations suggèrent qu'il faut reconsidérer les pratiques de fertilisation des cultures en sols riches afin de prévenir les problèmes de surfertilisation et de contamination des eaux de surface et souterraines [Bernier et *al.*, 1996].

À partir de la grille de référence pour la fertilisation des prairies et des pâturages, présentée au tableau 2.1, le Conseil des productions végétales du Québec (C.P.V.Q.) (1994) a établi des groupes de gestion des sols, basés sur des caractéristiques faciles à obtenir. Ceci a permis, entre autres, la mise au point de nouvelles grilles de références plus adaptées aux caractéristiques physico-chimiques des sols. La capacité de fixation du P telle que déterminée par la quantité de Al extrait au Mehlich III (ALM3), a été retenue pour la gestion du phosphore et la teneur en argile a été retenue pour établir les besoins en potassium en plus de la teneur en éléments disponibles par l'extrait au Mehlich III.

Tableau 2.1: Grille de référence de fertilisation des prairies et des pâturages

Analyse (kg P/ha)		Recommandation (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )		
		Capacité de fixation <sup>a</sup>		
		faible (moins de 1100) Groupe 1	moyenne (1100-1600) Groupe 2	forte (1601 et plus) Groupe 3
Pauvre	0-30	90	110	130
	31-60	70	90	110
Moyen	61-90	55	70	85
	91-120	40	50	60
Bon	121-150	20	30	40
Riche	151-250	0-20	20	25
Excessivement riche	251 et +	0	0	0

<sup>a</sup> Cette propriété est déterminée par la teneur en aluminium (mg kg<sup>-1</sup>) extrait selon la méthode Mehlich III

source: C.P.V.Q. (1994)

Les sols possédant une capacité de fixation en phosphore élevée transforment les apports d'engrais en des formes non disponibles pour la plante. Par conséquent, pour des sols ayant le même niveau de fertilité soit pauvre-moyen-bon-riche-excessivement riche à l'analyse (kg P/ha), le P est considéré moins assimilable dans un sol présentant une capacité de fixation élevée (>1600 mg kg<sup>-1</sup> de ALM3) qu'un sol comportant une faible capacité de fixation (<1100 kg ha<sup>-1</sup>). Un besoin d'engrais supplémentaire est donc nécessaire pour atteindre des rendements agronomiques économiquement optimaux. Par contre, pour les sols ayant une faible capacité de fixation, la quantité d'engrais appliquée peut être réduite. De plus, les recommandations d'engrais, pour les niveaux de fertilité élevée, ont été réduites afin de répondre à ces préoccupations agroenvironnementales. Cependant, dans la plus récente grille de fertilisation [C.P.V.Q., 1996], les recommandations d'engrais pour la culture du maïs ne tiennent pas encore compte des propriétés physiques des sols, telles que la désorption et la capacité de fixation pour chacun des niveaux de fertilisation.

On constate qu'en général les analyses de sol utilisées pour prédire les besoins en phosphore destinés à produire un rendement optimal, ne sont pas conçues pour indiquer les risques de contamination de l'eau par le phosphore [Sims, 1993].

## **2.8 Règlement sur la réduction de la pollution agricole**

Dans le projet de règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole au Québec [Gouvernement du Québec, 1997], une zone est considérée comme très sensible aux épandages de lisiers, fumiers ou engrais minéraux lorsque les sols ont des teneurs excessivement riches en P variant de plus de 250 kg P/ha (céréales, prairies, etc.) à plus de 401 kg P/ha (culture maraîchères) extrait à partir de la méthode Mehlich III [Tran et Simard, 1993]. Ce critère de restriction à l'emploi d'engrais phosphatés ne tient pas compte de la variabilité des caractéristiques physiques telles que la capacité de fixation et de désorption des sols. C'est précisément le 3 juillet 1997 que le règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole, qui remplace le règlement sur la prévention de la pollution des eaux par les établissements de production animale, est entré en vigueur [Gouvernement du Québec, 1997]. Ce règlement stipule, entre autres, que les exploitations agricoles auront à produire suivant un échéancier spécifique à chaque catégorie de production animale [MEF, 1997a], un plan agroenvironnemental de fertilisation. Ce plan vise à s'assurer que l'épandage d'engrais de ferme, d'engrais minéraux et de composts de ferme est planifié de façon à limiter les risques de surfertilisation des sols et à minimiser la contamination de l'eau. Les limitations d'épandage sont fondées sur un équilibre entre les besoins anticipés en éléments nutritifs des cultures, les apports à la culture provenant du sol et par les fertilisants de toutes sources, tout en tenant compte des divers éléments du milieu [MEF, 1997]. Comme il a été indiqué précédemment, il est suggéré de développer des règles pour contrôler l'application des fumiers, de lisiers et de fertilisants sur les terres cultivées. Pour le développement de ces règles, les indices de capacité de fixation et d'intensité de désorption du P devraient être exploités [Simard et *al.*, 1994].

## 2.9 Établissement de groupes de gestion des sols

Les sols ont des comportements spécifiques face aux nombreuses interventions que l'on exécute pour les mettre en valeur, en réduire les limitations naturelles et en hausser la productivité. Ce comportement spécifique est déterminé en grande partie par leurs propriétés intrinsèques (texture, origine, évolution génétique, drainage, etc.). Pour un type d'aménagement donné, il est cependant possible de grouper les sols (séries et types de sols) en groupe de comportement homogène (groupe de gestion). La capacité de fixation des sols est une caractéristique importante à prendre en compte dans l'établissement de groupe de gestion du P dans les sols. En effet, le comportement des sols face à l'apport d'intrants, P organique ou inorganique, détermine l'efficacité tant agronomique qu'environnementale du plan de fertilisation.

Ce groupement des sols peut être effectué à partir d'une ou de plusieurs variables dont l'influence sur la capacité de fixation et de désorption du P dans les sols est reconnue. Cependant ces variables sont souvent nombreuses et fortement corrélées entre elles, ce qui rend difficile l'établissement des multicritères nécessaires à la définition de ces groupes. L'analyse multivariée dispose d'une gamme de techniques statistiques qui se sont avérées fort utiles dans l'établissement et la définition de groupes naturels. Une telle approche est connue sous le nom de taxonomie numérique [Sneath et Sokal, 1973]. L'analyse multivariée fournit une méthode statistique pour l'étude des relations entre des variables présentant des corrélations multiples. Puisque plusieurs variables sont considérées simultanément, une interprétation peut être effectuée, ce qui n'est pas possible avec les statistiques univariées [James et McCulloch, 1990]. Les statistiques multivariées permettent de décrire et de dresser un portrait entre les objets à classer. Ces applications statistiques sont maintenant usuelles en agriculture. Certains pédologues ont appliqué ces techniques à l'étude de la caractérisation des séries de sols [Hartman et *al.*, 1976; Muir et *al.*, 1970; Nolin et *al.*, 1982]. Cette approche a ensuite été utilisée pour dériver des classifications interprétatives des comportements des sols. Kyuma et Kawaguchi (1973)

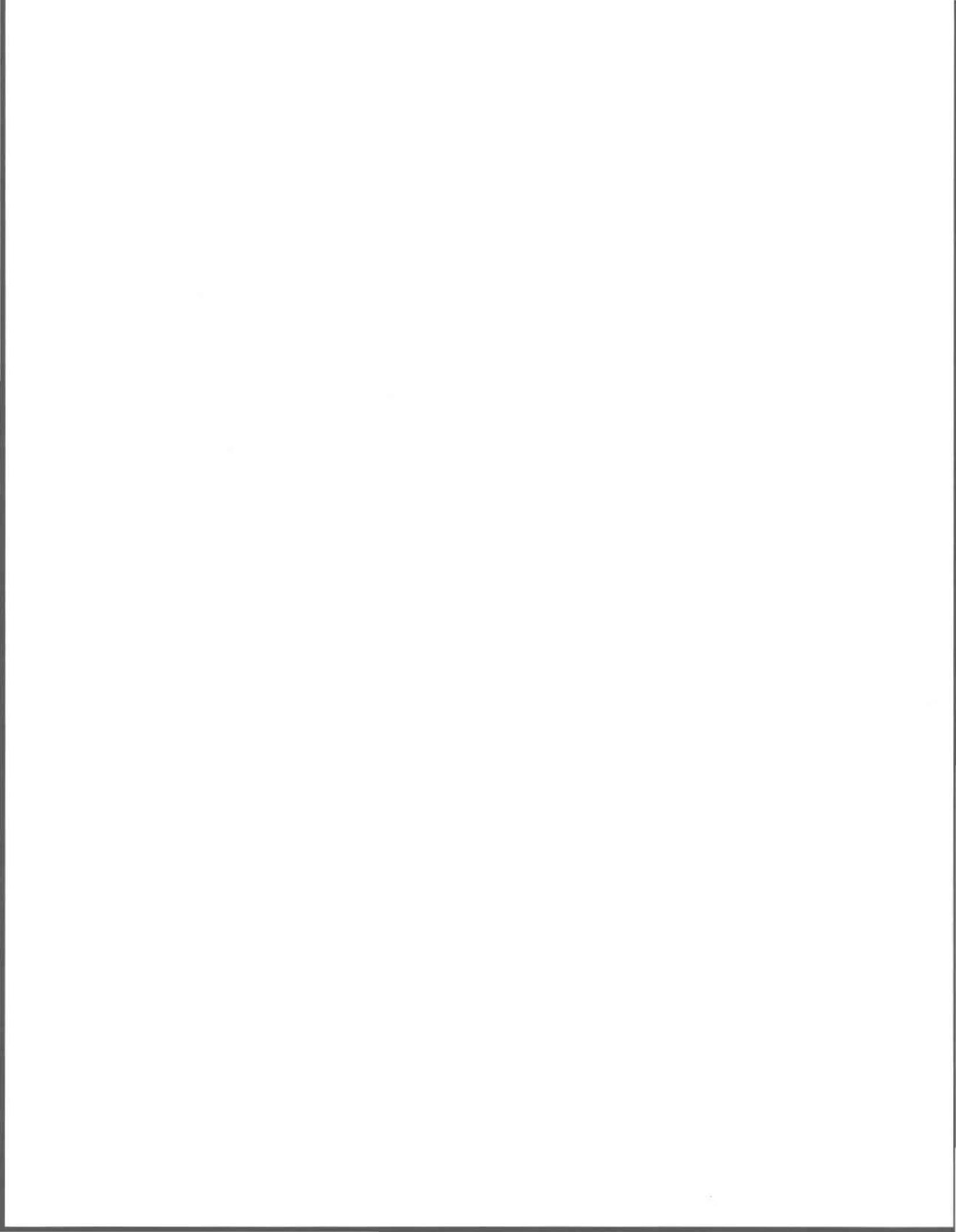
l'ont appliquée pour établir une calibration du potentiel de fertilité des sols de rizières. Schreier et Zulkifli (1983) s'en sont servis pour regrouper des sols provenant de la Colombie-Britannique en classes d'aménagement en utilisant les propriétés chimiques et physique de ces sols. Nolin et *al.* (1989) ont aussi utilisé les statistiques multivariées pour élaborer une classification selon le degré de fertilité, basé sur des descripteurs pédologiques à partir d'unités cartographiques de sol de la plaine de Montréal. Quiroga et *al.* (1998) ont utilisé ces techniques pour évaluer les effets des différents modes de gestion des sols sur les propriétés physiques des sols.

Ces travaux ont démontré l'efficacité de l'analyse statistique multivariée dans le développement de groupement interprétatif à partir d'un ensemble de données pédologiques.

C'est l'avènement de l'ordinateur et le développement des techniques statistiques [Bidwell et Hole, 1964] qui ont contribué à l'essor de la taxonomie numérique des sols [Sneath et Sokal, 1973]. Ces procédures sont plus objectives, efficaces et rapides, que les méthodes plus conventionnelles pour étudier des objets par rapport à un ensemble de variables analysées. En effet, les groupements sont formés selon une procédure mathématique objective et documentée [Mulcahy et Humphries, 1967], ce qui permet, entre autres, à d'autres chercheurs de reproduire les mêmes résultats, à la condition d'utiliser la même méthode mathématique et que la banque des observations et les méthodes analytiques soient identiques. Cependant, l'analyse numérique peut avoir une certaine part de subjectivité en ce qui a trait au choix des variables et des objets d'une étude. Certains chercheurs précisent que l'emploi abusif de variables ayant une corrélation logique entre elles, peut entraîner de la tautologie et ainsi empêcher une bonne évaluation des analogies entre les objets [Sneath et Sokal, 1963]. Cette situation est des plus embarrassantes pour l'étude des sols puisque la plupart des variables présentent souvent une corrélation simple entre elles, tandis que d'autres sont expliquées partiellement par des combinaisons des autres variables [Mulcahy et Humphries, 1967].

---

Les techniques statistiques les plus employées, en taxonomie numérique, sont l'ordination en espace réduit, c'est-à-dire une réduction de la matrice originale des données sur lesquelles sont effectuées un regroupement des objets étudiés, à une ou quelques dimensions, et l'analyse de groupement définie comme étant une classification d'objets dans des catégories basées sur une matrice de similarité ou de distance entre les objets [James et McCulloch, 1990]. Pour différencier et définir les groupes ainsi formés, les analyses discriminante et de variance sont souvent utilisées. Les fonctions linéaires discriminantes permettent en plus de générer des fonctions de classification qui permettront de calculer la probabilité d'appartenance de nouveaux objets à l'un ou l'autre de ces groupes et à définir quelles sont les variables qui contribuent le plus à différencier les groupes [Quiroga et *al.*, 1998].



## **3. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE**

---

### **3.1 Description du territoire**

#### **3.1.1 Le territoire à l'étude**

Le territoire étudié est situé dans le sud-est de la plaine de Montréal, il regroupe les comtés de Richelieu, de Chambly, de Saint-Hyacinthe, de Verchères et de Rouville. L'ensemble de ces comtés couvrent une superficie de 269 705 ha. Ce territoire fait partie de 6 municipalités régionales de comté (M.R.C.): Champlain, Vallée-du-Richelieu, Lajemmerais, Maskoutains, Bas-Richelieu et Rouville. Une carte géographique du territoire à l'étude est présentée à l'Annexe A. Le relief est généralement plat avec une pente de 0 à 3 %, à l'exception des collines Montérégiennes. La production agricole occupe une très grande place dans le territoire malgré les pressions qu'exercent l'expansion démographique de la région métropolitaine de Montréal et le développement des secteurs industriel et manufacturier.

#### **3.1.2 Cadre agricole**

Dans le sud-est de la plaine de Montréal, l'agriculture est de plus en plus spécialisée et intensive. C'est l'utilisation de techniques d'aménagement telles que le drainage souterrain qui ont permis de pratiquer une agriculture plus intensive de maïs-grain, de blé, d'orge et de soya [Nolin et *al.*, 1991]. Les principales productions agricoles qui occupent le territoire à l'étude sont: les grandes cultures céréalières dont le maïs-grain, la production laitière, l'élevage du porc et les cultures maraîchères. La culture des céréales et du maïs est intimement liée à la production animale. Les productions porcine et avicole plus spécialisées sont principalement situées dans les M.R.C. de Maskoutains et de Rouville. Selon le recensement agricole de 1996, on dénombrait environ 4 210 000 poules et poulets et 675 000 porcs dans ces deux régions [Statistiques Canada, 1997]. Dans le tableau 3.1,

pour chacune des M.R.C., est présenté le nombre total de fermes et la superficie des terres en cultures. Un recensement des cultures céréalières et du maïs est présenté au tableau 3.2.

Tableau 3.1: Superficies des terres en cultures et dénombrement des exploitations de la région à l'étude.

M.R.C.	Superficie des fermes		Terres en culture		Pâturage		Autres cultures		Total des terres cultivées (ha)
	n	(ha)	n	(ha)	n	(ha)	n	(ha)	
Champlain	35	1582	27	1 210	15	84	27	-	<b>1 294</b>
Vallée-du-Richelieu	429	37 134	390	30 783	173	1 223	325	4 929	<b>36 935</b>
Lajemmerais	263	20 888	263	17 573	122	1 393	197	1 894	<b>20 860</b>
Bas-Richelieu	381	38 488	381	30 115	215	2 576	302	-	<b>32 691</b>
Maskoutains	1 375	110 921	1 155	90 081	519	5 538	1075	15 246	<b>110 865</b>
Rouville	697	41 801	604	31 807	304	4 218	559	7 507	<b>43 532</b>
<b>Total</b>	<b>3 180</b>	<b>250 814</b>	<b>2 820</b>	<b>201 569</b>	<b>1 348</b>	<b>15 032</b>	<b>2 485</b>	<b>29 576</b>	<b>246 177</b>

n= nombre d'exploitations

-: données non disponibles

Source: Statistiques Canada (1997)

Tableau 3.2: Superficies occupées par les grandes cultures céréalières et le maïs-grain

M.R.C.	Blé		Orge		Avoine		Mélanges de céréales		Maïs-grain	
	n	(%)	n	(%)	n	(%)	n	(%)	n	(%)
Champlain	3	10.2	4	2.9	5	6.9	0	-	7	9.9
Vallée-du-Richelieu	133	7.1	78	2.7	51	1.6	11	0.3	202	26.3
Lajemmerais	74	9.9	46	2.8	23	1.2	4	0.2	84	20.9
Bas-Richelieu	56	6.3	83	4.0	62	1.8	17	0.5	208	44.3
Maskoutains	267	3.9	218	2.6	80	0.7	32	0.3	872	43.8
Rouville	79	3.0	114	3.8	37	0.7	6	0.2	96	13.1
<b>Total</b>	<b>612</b>	<b>4.9</b>	<b>543</b>	<b>3.1</b>	<b>258</b>	<b>1.0</b>	<b>70</b>	<b>0.3</b>	<b>1469</b>	<b>33.7</b>

-: données non disponibles

n= nombre d'exploitations

(%)= pourcentage des terres en culture= superficie de la culture/superficie totale des terres cultivées (pour chacune des M.R.C.)

Source: Statistiques Canada (1997)

La production laitière est aussi importante dans les M.R.C. de Maskoutains, Rouville et Bas-Richelieu. Les cultures associées à cette production sont le maïs, le maïs à ensilage, la luzerne et les plantes fourragères. Ces cultures sont fertilisées en grande partie par des

engrais de ferme. Un inventaire des plantes fourragères et légumineuses est présenté au tableau 3.3.

Les cultures maraîchères telles que la pomme de terre, les légumes de transformation et les petits fruits sont présentes sur le territoire, mais occupent de plus petites superficies. Ces cultures spécialisées demandent beaucoup de fertilisants et de pesticides, tout comme le maïs grain. Les superficies ayant reçu des engrais organiques ou chimiques et des pesticides, répertoriées en 1996, sont présentées aux figures 3.1 et 3.2.

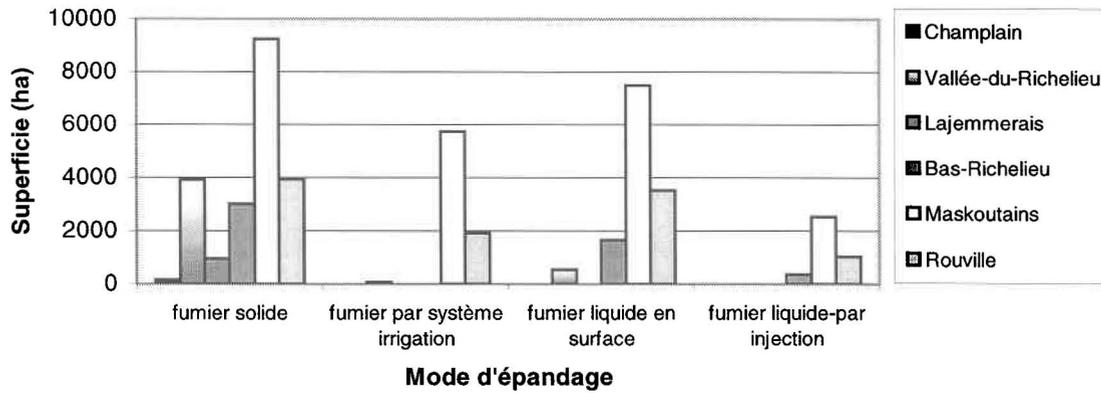
Tableau 3.3: Superficies occupées par les plantes fourragères et les légumineuses

M.R.C.	Maïs à ensilage		Luzerne et mélange de luzerne		Foin cultivé et autres cultures fourragères		Soya	
	n	(%)	n	(%)	n	(%)	n	(%)
Champlain	3	2.6	7	7.5	14	23.3	7	26.4
Vallée-du-Richelieu	54	1.0	129	16.9	111	5.6	187	16.9
Lajemmerais	19	0.6	74	10.1	97	11.2	123	21.4
Bas-Richelieu	64	1.6	117	7.2	152	10.6	106	12.7
Maskoutains	166	1.3	272	4.6	318	6.3	518	11.2
Rouville	98	2.4	147	7.3	166	7.9	165	10.1
<b>Total</b>	<b>404</b>	<b>1.4</b>	<b>746</b>	<b>7.8</b>	<b>858</b>	<b>7.6</b>	<b>1 106</b>	<b>13.0</b>

n= nombre d'exploitations

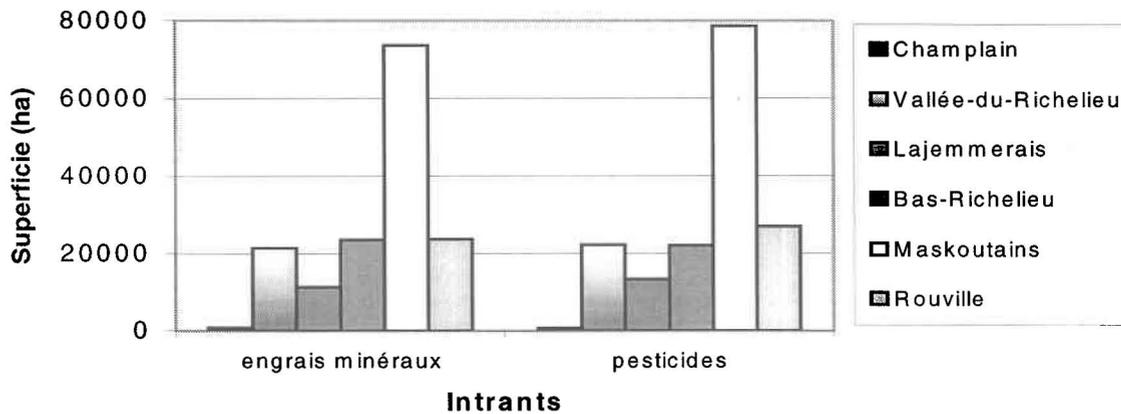
(%)= pourcentage des terres en culture= superficie de la culture/superficie totale des terres cultivées (pour chacune des M.R.C.)

Source: Statistiques Canada (1997)



Source: Statistiques Canada (1997)

Figure 3.1: Superficies de terres cultivées recevant des fumiers et lisiers selon divers modes d'épandage



Source: Statistiques Canada (1997)

Figure 3.2: Superficies de terres cultivées recevant une fertilisation minérale et des pesticides

La densité animale, exprimée par le total du nombre d'unités animales du territoire divisé par sa superficie (ha), a des valeurs dans les M.R.C. de Maskoutains (1,2) et de Rouville (1,5) du même ordre que celles de Chaudières-Appalache (1,5) et de Lanaudière (1,2) [MEF, 1997b; Deslisle, 1997]. Selon les agronomes spécialistes en environnement, on commencerait à avoir des problèmes environnementaux autour de 1,2 unités animales ha<sup>-1</sup>. Les unités animales des M.R.C. étudiées ont été calculées selon le poids, l'âge et la productivité des animaux [Annexe1; Gouvernement du Québec, 1997]. De plus, ce secteur abrite une agriculture plus industrielle que les autres régions du Québec et par le fait même utilise davantage d'engrais et d'intrants. L'agriculture intensive et la forte concentration animale peuvent avoir une influence directe sur la pollution des cours d'eau. Les aménagements liés à cette forme d'agriculture contribuent à accentuer le compactage des sols, l'érosion des particules de sols, le déplacement de polluants par le système de drainage et le ruissellement de surface. La dégradation des sols augmente les coûts de production, forçant une augmentation des intrants nécessaires pour l'obtention d'un rendement intéressant. Ces pratiques ont aussi une incidence sur les risques de pollution diffuse par le phosphore. L'implantation de mesures favorisant la conservation des sols telle que le maintien des résidus de culture, l'aménagement de voies d'eau engazonnées, les cultures intercalaires et les engrais verts, peut aider à contrôler les risques de contamination de l'eau par le phosphore.

### **3.1.3 Cadre climatique de la région**

Cette région du Québec est très intéressante pour l'agriculture, puisqu'elle jouit d'un climat favorable. La somme des degré-jours annuels pour une température seuil de 5 °C, requise pour la germination nécessaire des céréales, varie entre 1 939 et 2 125 et entre 916 et 1 064 pour une température seuil de 10 °C, ce qui est critique pour la culture du maïs et des fèves. Le nombre d'unités thermiques-maïs (UTM) disponibles est en moyenne de 2 500 à 2 700 UTM dans le comté de Richelieu et de plus de 2 700 pour les autres comtés. La période sans gel est d'environ 140 jours. La saison de croissance végétale s'échelonne entre 201 à

208 jours, situés entre le 10-14 avril jusqu'au 4 novembre, calculés selon le nombre de jours où la température moyenne journalière dépasse 5 °C [Dubé et Chevrette, 1981].

### **3.1.4 Cadre pédologique**

Le territoire à l'étude se situe dans la région pédologique de la plaine de Montréal [Lamontagne et Nolin, 1997]. Les sols de cette région se sont formés sur des matériaux déposés avant et après la formation de la mer de Champlain. Cette région fut le principal site de sédimentation de particules d'argile et de limon de la mer de Champlain et du Lac Lampsilis, lesquelles ont progressivement recouvert les dépôts glaciaires. Les sols argileux et limoneux sont dominants. Formés par la disposition de couches superposées, ces sols sont neutres ou alcalins, mal à imparfaitement drainés. Ils appartiennent aux gleysols humiques ou orthiques.

Le retrait graduel des eaux a entraîné la formation de deltas sub-aquatiques et de terrasses sableuses qui ont recouvert les dépôts lacustres, marins et glaciaires. Les sols formés de ces matériaux sont de texture grossière, de drainage bon à très mauvais et varient d'acides à neutres. Les sols occupant la bordure des terrasses ont évolué vers des podzols humo-ferriques orthiques ou gleyifiés. Ceux situés au centre des terrasses, en position dépressionnaire, ont plutôt évolué vers des gleysols humiques ou orthiques ou des podzols humiques. L'épaisseur du dépôt de sable sur un matériau contrastant (inférieure ou supérieure à 75 cm) et la granulométrie du matériau sous-jacent (loameux ou argileux), ont servi de critères de différenciation aux séries de sols développées sur ces matériaux.

Dans d'autres secteurs de la plaine, les courants fluviaux du proto-St-Laurent érodèrent les argiles jusqu'aux dépôts glaciaires. Le remaniement de ces matériaux de tills ou de dépôts glacio-lacustres, déposés sur des terres légèrement ondulées à vallonnées, a entraîné la formation de brunisols ou de gleysols. Ces sols ont la particularité d'avoir une granulométrie loameuse ou squelettique-loameuse, d'être bien à mal drainés et d'être généralement riches en carbonates.

Une première étude pédologique a été effectuée à une échelle de 1:63 360 (un mille au pouce) pendant la seconde guerre mondiale [Baril et Mailloux, 1942a; Baril et Mailloux 1942b; Laplante et *al.*, 1942; Thériault et *al.*, 1942; Choinière et *al.*, 1942]. Ces études ont permis de planifier la mise en valeur des terres présentant un des plus forts potentiels agricoles de la province [Nolin et *al.*, 1991] et de localiser les zones propices à l'expansion de la betterave à sucre et du lin [Baril, 1986]

Une seconde étude de la région a été entreprise en 1975 à l'échelle de 1:20 000 basée sur une densité moyenne d'observations sur le terrain de 0,25 site par ha. Cette prospection pédologique a permis l'élaboration de recueils destinés à tout utilisateur voulant connaître les caractéristiques, les limitations et le potentiel agricole des sols de chacun des comtés tels que représentés dans le tableau 3.4. Chaque rapport présente une description et diverses interprétations des unités cartographiques et des séries de sols; ils sont aussi accompagnés de cartes pédologiques à l'échelle 1:20000 [Lamontagne et Nolin, 1990; Nolin et Lamontagne, 1990; Lamontagne, 1991; Martin et Nolin, 1991; Grenon et *al.*, 1999]. Ces études récentes détaillées fournissent des informations pédologiques précises et fiables, tant au niveau des propriétés physiques des sols que de leurs propriétés chimiques [Nolin et *al.*, 1991].

L'inventaire, relié à la cartographie pédologique de la région, repose également sur l'échantillonnage aléatoire et stratifié de quelques 5 158 échantillons de sols prélevés à partir de la couche de surface (horizon A), du sous-sol (horizon B) ou du substratum (horizon C). Cette banque de sols gérée par le Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures (CRDSGC) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada a servi de base à cette recherche.

Le système de classification taxonomique des sols utilisé au Canada [Comité d'experts sur la prospection pédologique d'Agriculture Canada (C.E.P.P.A.C), 1987] se base sur la variabilité verticale du profil. Les séries de sols sont différenciées selon leur stratigraphie et

leur évolution génétique. La série regroupe les sols formés d'un matériau originel particulier et ayant un nombre et un arrangement similaires d'horizons dont les propriétés, à l'exception de la texture de la couche de surface, oscillent entre des limites préétablies. Les unités cartographiques ont été nommées d'après leur composante principale, soit la série de sol dominante.

Puisque le transport des solutés dans les sols est principalement affecté par la variabilité verticale de la texture et des propriétés physiques, l'utilisation de la série de sols est tout à fait pertinente à une classification des sols selon leur comportement vis-à-vis l'apport d'intrants comme le phosphore. Cependant, comme la texture de la couche de surface influence significativement les propriétés et le comportement des sols, le type de sol (phase de texture des séries de sols) a également été retenu dans la stratégie d'échantillonnage de la présente étude.

Les cinq comtés à l'étude ont fait l'objet d'une prospection pédologique à l'échelle de 1:20 000, effectuée selon les normes et critères du système canadien de classification des sols [C.E.P.A.C, 1987]. Chacun de ces comtés est décrit sommairement au tableau 3.4 quant à sa superficie, à la nature et aux particularités de ses sols.

Tableau 3.4: Répartition des sols dans les comtés à l'étude

Comté	Superficie totale (ha)	Types de sol occupant le territoire	Séries et variantes <sup>a</sup>	Autres caractéristiques	
Rouville	61 222	Sols minéraux : ▪ argileux ▪ loameux ▪ sableux ▪ squelettique Sols organiques : Non sols :	81.6% 35.1% 25.4% 16.5% 4.6% 1.6% 16.8%	76	Environ 70 % du territoire est utilisé à des fins agricoles. Relief plat dans la plaine et ondulé en bordure des Appalaches. Présence de sols issus de matériaux de till glaciaire peu perméables et facilement érodables.
Richelieu	48 635	Sols minéraux : ▪ argileux ▪ loameux ▪ sableux Sols organiques : Non sols :	84.0% 16.8% 26.0% 41.2% 1.7% 14.3%	49	Mauvais drainage des terres, abondance de limon et de sable fin à très fin dans les matériaux originels, présence de carbonates dans le substratum et de forte quantité d'humus dans la couche de surface de plusieurs sols.
Verchères	53 770	Sols minéraux : ▪ argileux ▪ loameux ▪ sableux ▪ squelettique Sols organiques : Non sols :	85.1% 58.9% 7.1% 18.3% 0.8% 0.4% 14.5%	56	Plus de 80 % des terres sont utilisées à des fins agricoles. Prépondérance des sols argileux.
Chambly	35 418	Sols minéraux ▪ argileux ▪ loameux ▪ sableux ▪ squelettiques Sols organiques : Non sols :	62.2% 50.7% 8.4% 0.7% 2.4% 1.0% 36.8%	59	Environ 50 % du territoire est utilisé à des fins agricoles. Le tiers de la superficie du comté, est utilisé pour le développement industriel et urbain. Les sols argileux y sont très importants.
St-Hyacinthe	70 660	Sols minéraux : ▪ argileux ▪ loameux ▪ sableux ▪ squelettiques Sols organiques : Non sols :	91.7% 29.0% 29.7% 32.3% 0.7% 1.4% 6.9%	45	Plus de 75 % du territoire est utilisé à des fins agricoles. Proportion égale des sols d'origine marine, alluviale ou estuarienne et fluviale.

<sup>a</sup> Nombre de séries et de variantes définies et classifiées selon les règles du système canadien de classification des sols (C.E.P.P.A.C., 1987)

Source: Lamontagne et Nolin (1990); Nolin et Lamontagne (1990); Lamontagne (1991); Martin et Nolin (1991); Grenon et al. (1999)

## 3.2 Description des indicateurs de la banque de données

### 3.2.1 Sélection des indicateurs de la banque de données

Ainsi, 514 échantillons (10%) ont été sélectionnés dans la banque (CRDSGC) de manière à représenter les principales séries (39 sur 126) et types (66 sur 233) (phase de texture de surface d'une série de sols) de sols de la région de Montréal.

Les types et séries de sols étudiés ont été choisis afin de représenter différents groupes:

- d'évolution génétique (podzol, brunisol et gleysol),
- de matériaux originels (marin, estuarien, fluvial et glaciaire),
- de texture de la couche de surface (sable, loam sableux, loam, loam argileux et argile),
- de texture du sous-sol et du substratum (sableux, loameux et argileux) et
- de contenu en carbonates (nul, faible et fort).

Ce choix avait pour objectif de couvrir une vaste gamme de caractéristiques de sols représentant bien la région et aussi prendre en considération la superficie qu'ils occupent sur le territoire étudié. Pour bien représenter chacune des séries et types de sols, les échantillons de sol ont été sélectionnés aléatoirement, certains profils comportant des données manquantes ont été exclus. En moyenne quatre échantillons de la couche de surface (horizon A) (277 échantillons) ont été sélectionnés par type de sol. De même, trois échantillons du sous-sol (horizon B) (119 échantillons) et du substratum (horizon C) (117 échantillons) ont été sélectionnés par série de sols. Le nombre restreint d'échantillons (répétition) est fonction des analyses de sols supplémentaires à effectuer sur ces sols et des résultats analytiques déjà disponibles.

L'Annexe B présente une description sommaire des séries de sols retenues pour l'étude. Les caractéristiques propres à chaque série de sols telles que la description des matériaux qui les composent, leur origine et leur appartenance à un sous-groupe y sont présentées. En plus,

on y retrouve les types de sols sélectionnés et la superficie totale qu'occupent les séries dans les différents comtés étudiés.

Les caractéristiques de sols disponibles dans la banque de données du CRDSGC étaient la granulométrie (sable, limon et argile), la capacité d'échange cationique (C.E.C.), le pH à l'eau et au  $\text{CaCl}_2$ , les bases échangeables telles que Ca, Mg, K et Na extractibles à l'acétate d'ammonium, le phosphore extractible selon la méthode Bray-2 et le contenu en carbone organique. Ces caractéristiques offrent une grande possibilité d'interprétation du comportement des sols. L'analyse granulométrique a pour objectif de déterminer la composition du sol selon la répartition des particules de limon, argile et sable constituant le sol. Les cations échangeables, la C.E.C. et le phosphore assimilable, expriment de façon générale le potentiel de fertilité des sols. La matière organique est également un indicateur de la fertilité, de la qualité structurale et de l'activité microbienne du sol. Le pH quant à lui exprime l'état d'équilibre du sol propice à l'activité chimique et microbiologique du sol.

Les échantillons de sol collectés durant la prospection pédologique des comtés ont été décrits selon les méthodes recommandées et décrites dans le Manuel de méthodes d'échantillonnage et d'analyse des sols [Carter, 1993]. D'autre part, quelques méthodes analytiques ont plutôt été extraites du Manuel des méthodes d'analyse des sols et des fumiers publié par le Conseil des productions végétales du Québec [Nault et Guilbault, 1985]. Les différentes méthodes sont présentées au tableau 3.5. En plus des informations pédologiques présentes dans la banque de données (méthodes traditionnelles), les échantillons ont été analysés selon les méthodes modernes de détermination de ces indicateurs. Les contenus en calcium, magnésium, potassium, sodium, phosphore, fer, manganèse, aluminium et cuivre, ont été extraits par la solution extractive Mehlich III [Tran et Simard, 1993]. Cette méthode est actuellement utilisée dans les laboratoires de sol comme analyse de routine pour évaluer la disponibilité des éléments nutritifs du sol.

Pour bien représenter les sols et permettre de les regrouper à partir de leur capacité de fixation et aussi par d'autres indicateurs relatifs à la sorption et à la désorption du phosphore, d'autres analyses ont été effectuées (Tableau 3.5). La détermination de la capacité de fixation en P, définie comme l'aptitude d'un sol à retenir le P, a été évaluée par l'indice de rétention PSI de Bache and Williams (1971). La méthode utilisée pour obtenir cet indice est basée sur l'addition d'une concentration connue de P au sol étudié.

Tableau 3.5: Liste des indicateurs et méthodes d'analyses dans cette étude

Code de la variable	Unité de mesure	Description de la méthode	Références
PM3, KM3, AIM3, FEM3, CUM3, NAM3, MNM3, MGM3, CAM3,	mg. kg <sup>-1</sup>	P, Al, Fe, Cu, Na, Mn, Mg, Ca et K extrait au Mehlich III	Tran et Simard (1993)
ALOX, FEOX, POX	mg.kg <sup>-1</sup>	Al, Fe et P extrait à l'oxalate d'ammonium	Ross et Wang (1993)
PW	mg. kg <sup>-1</sup>	P soluble à l'eau	Modifiée de Sissingh (1971), par Beauchemin et al. (1998)
PSI <sup>a</sup>	...	Indices de sorption en P	Bache et Williams (1971)
PSATM3	%	Degré de saturation en P [(100. PM3/ALM3)]	Giroux et al. (1996)
PSATOX <sup>b</sup>	%	Degré de saturation en P [POX/(FEOX+ALOX)]	Van der Zee et al. (1988)
STOT, ATOT	%	Teneur en sable et argile, méthode de l'hydromètre	Sheldrick et Wang, (1993)
PBR2	mg. kg <sup>-1</sup>	P extrait par Bray-2	Nault et Guilbault (1985)
NA, K, MG, CA	cmol kg <sup>-1</sup>	Bases échangeables Na, K, Mg et Ca extrait par acétate d'ammonium à pH 7	Nault et Guilbault (1985)
CEC	cmol kg <sup>-1</sup>	Capacité d'échange cationique, évaluée par acétate d'ammonium à pH 7	Nault et Guilbault (1985)
CORG	%	Carbone organique, oxydation par voie humide,	Tiessen et Moir (1993)
PHCA	...	pH mesuré dans le CaCl <sub>2</sub>	Hendershot et al. (1993)
PHEAU	...	pH mesuré dans l'eau	Hendershot et al. (1993)

a PSI= X/log C, où X= quantité de P sorbé (mg/kg) et C= concentration de P en solution (mg/L)

b Après Pox, Feox et Alox sont exprimés en mmol/kg

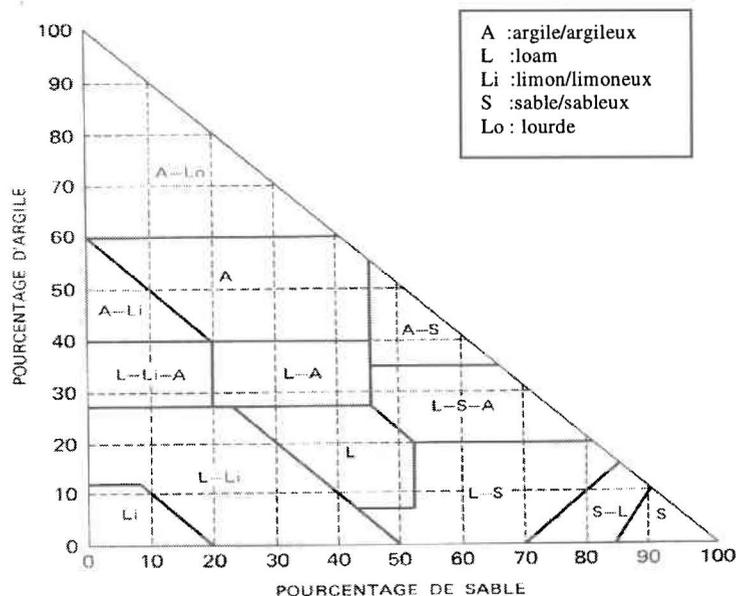
Deux indices de saturation en P ont été calculés, l'un à partir du P, Fe, Al extraits à l'oxalate d'ammonium, désigné par PSATOX=[POX/(ALOX+FEOX)], où POX (P total de l'extrait) représente la quantité de P sorbé au sol et le terme au dénominateur indique la capacité maximale de rétention du sol en P. L'autre à partir des éléments P et Al extrait par la solution Mehlich III, décrit par l'indice PSATM3=[100.PM3/ALM3], où PM3 représente

de P disponible et ALM3 estime la capacité de fixation en P. Un indice de désorption en P a aussi été déterminé par le contenu en P soluble à l'eau (PW).

### 3.2.2 Propriétés utilisées pour l'interprétation des groupements

D'autres caractéristiques de sols disponibles dans les études pédologiques ont été utilisées pour l'interprétation des groupements. Pour chacune des couches de sol, les échantillons de la banque seront qualifiés par leur texture, le type d'horizons (évolution génétique), le contenu en calcaire et le grand groupe de sol (taxonomie).

La texture exprime la proportion relative des différentes fractions granulométriques: sable, limon et argile (Figure 3.3). Afin de tenir compte de la précision et de la fiabilité des études pédologiques publiées à l'échelle du 1:20 000, ces classes texturales ont été regroupées. Six classes ont été définies pour décrire la texture de la couche de surface (Tableau 3.6) et trois classes pour décrire celles des horizons B et C (Tableau 3.7).



Source: C.E.P.A.C., 1987

Figure 3.3: Diagramme des classes texturales du sol

Tableau 3.6: Différentes catégories de texture de la couche de surface

Classes	Texture
1	Sable grossier, sable, sable grossier loameux, sable loameux, sable fin, sable fin loameux, sable très fin.
2	Loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin et sable très fin loameux
3	Loam sableux très fin, loam et loam limoneux
4	Loam sablo-argileux, loam argileux et loam limono-argileux
5	Argile sableuse, argile, argile limoneuse et argile lourde
H	Humifère (> 9 % C organique)

Source: Lamontagne et Nolin (1990)

Tableau 3.7: Différentes catégories de texture des horizons B et C

Classes	Type	Texture
S	Sableux	Sable grossier, sable, sable grossier loameux, sable loameux, sable fin, sable fin loameux et sable très fin.
L	Loameux	Loam sableux grossier, loam sableux, loam sableux fin, sable très fin loameux, loam sableux très fin, loam, loam limoneux, loam sablo-argileux, loam argileux et loam limono-argileux
A	Argileux	Argile sableuse, argile, argile limoneuse et argile lourde.

Source: Lamontagne et Nolin (1990)

Pour les échantillons du sous-sol et du substratum, la nature des horizons permet de mieux interpréter les groupements formés. Les horizons sont nommés selon les processus pédogénétiques qui les affectent. Les différents types d'horizons sont présentés au tableau 3.8.

Tableau 3.8: Définition des horizons présents dans le sous-sol et le substratum

Horizons	Description
Bg	Horizon présentant de la marmorisation due à un mauvais drainage.
Bgf	Horizon ayant les caractéristiques du 'Bg' mais présentant une marmorisation plus intense et un contenu plus élevé en fer libre
Bf	Horizon enrichi en matériau amorphe (fer et aluminium) combiné avec de la matière organique.
Bfj	Horizon 'Bf' dont les caractéristiques sont faiblement exprimées
Cg	Horizons présentant des signes de réduction due à un mauvais drainage.
Ckg	Horizon indiquant la présence de carbonates en plus d'être affecté par le processus de gleyification .

Source: C.E.P.P.A.C. (1987)

La classification taxonomique des sols au niveau de l'ordre et du grand groupe permet aussi d'apporter de l'information intéressante pour l'interprétation des groupements. Les principales catégories, au niveau de l'ordre, présentes dans la région sont le podzol, le gleysol et le brunisol. Leur description est basée sur les propriétés du pédon<sup>1</sup> qui représentent la nature de l'environnement du sol et les effets des processus dominants de formation des sols. Chacune de ces catégories est divisée en un nombre donné de grands groupes. Ces catégories sont basées sur l'intensité du processus génétique dominant ou la forte contribution d'un second processus en plus du dominant [C.E.P.P.A.C.,1987]. La définition de chacun des grands groupes est donnée dans le tableau 3.9.

<sup>1</sup> La plus petite unité tridimensionnelle qui représente tous les horizons d'un sol.

Tableau 3.9: Caractéristiques générales des grands groupes de sol

Ordres	Grands groupes	Description
Gleysol	Gleysol (G)	Ces sols présentent les propriétés générales de l'ordre gleysolique
	Gleysol humique (GH)	Ces sols présentent en plus des propriétés générales de l'ordre gleysolique: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Horizon Ah &gt; 10 cm</li> <li>▪ C organique &gt; 2 %</li> </ul>
Brunisol	Brunisol sombre (BS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Horizon Ah &gt; 10 cm</li> <li>▪ C organique &gt; 2 %</li> <li>▪ pH CaCl<sub>2</sub> &lt; 5.5</li> </ul>
Podzol	Podzol humique (PH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Horizon podzologique (Bh) &gt; 10 cm</li> <li>▪ C organique &gt; 1%</li> <li>▪ Fe pyrophosphate &lt; 0.3 %</li> </ul>
	Podzol humo-ferrique (PHF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Horizon podzologique (Bf) &gt; 10 cm</li> <li>▪ C organique = 0.5 à 5 %</li> <li>▪ Fe+Al pyrophosphate ≥ 0.4% sols sableux ou ≥ 0.6 % (autres sols)</li> </ul>

Source: C.E.P.P.A.C. (1987)

Un autre critère qui a permis de qualifier les échantillons de sol, est le contenu en carbonates dans les horizon B et C. Les classes calcaires sont définies comme étant la quantité de carbonates de calcium (CaCO<sub>3</sub> (%)) présente dans le sol, exprimée en pourcentage d'équivalent de CaCO<sub>3</sub> (Tableau 3.10).

Tableau 3.10: Système de classification du contenu en carbonates des sols

Classes	Équivalent de CaCO <sub>3</sub> (%)
nulle	0 - 1 %
faible	1 - 6 %
forte	6 - 40 %

Source: Lamontagne et Nolin (1990)

Les deux indices de saturation en phosphore définis précédemment, ont été regroupés en classe pour faciliter l'interprétation des groupements. La même classification a été utilisée pour les deux indices [Bolinder et *al.*, 1998] (Tableau 3.11).

Tableau 3.11: Saturation des sols en phosphore

Classe	Saturation en P
1	0 - 2.5 %
2	2.5 - 5.0 %
3	5 - 10 %
4	10 - 20 %
5	> 20 %

Source: Bolinder et *al.* (1998)

### 3.3 Analyses et traitements statistiques des données

#### 3.3.1 Statistiques descriptives et analyses de la normalité

La première étape consiste à effectuer une description statistique des différentes variables utilisées à l'aide de la moyenne, de l'écart-type, du coefficient de variation et des valeurs minimales et maximales observées. Ces mesures permettent d'identifier les données aberrantes et de reprendre les analyses ou d'éliminer les valeurs extrêmes. L'objectif est de valider la base de données et de vérifier les conditions de normalité dans la distribution des

variables. La moyenne arithmétique a permis de déterminer la tendance centrale de chacune des variables. Par contre, cette mesure ne peut pas exprimer l'étendue ou la dispersion des données. Elle doit être combinée avec la mesure de l'écart-type. Le coefficient de variation (C.V.) est très utile pour comparer la variabilité de chacune des variables entre elles, car ce paramètre n'est pas affecté par l'unité de mesure de la variable puisqu'il exprime l'écart-type en pourcentage de la moyenne [Webster et Oliver, 1990]. Les tableaux 3.12, 3.13 et 3.14 présentent ces statistiques pour la couche de surface, le sous-sol et le substratum.

À l'examen de ces tableaux, on constate que la variable PW et l'ensemble des éléments extraits au Mehlich III à l'exception de ALM3 et FEM3, ont des mesures élevées de coefficient de variation dépassant même parfois 100%. Le coefficient de variation des variables POX, ALOX, FEOX demeure élevé, mais pas autant que celui des variables précédentes. La variable PSATM3 montre une plus grande valeur de C.V. que l'indice PSATOX. Les bases échangeables et la capacité d'échange cationique ont en général aussi des valeurs moins élevées que celles extraites au Mehlich III. Il est normal d'avoir dans ce jeu de données de fortes valeurs de C.V., car l'échantillon comporte une grande diversité de sols, de cultures et de pratiques culturales et représente un large territoire ainsi que plusieurs années de mesure.

Tableau 3.12: Statistiques descriptives de la couche de surface (horizon A)

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation (%)
PSI	1	1 440	258	200	78
PW (mg.kg <sup>-1</sup> )	0	40	4	5	118
PM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.24	324	47	45	97
CUM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.53	13	3	2	71
MNM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.52	763	26	48	185
FEM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	74	663	296	95	32
CAM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	95	22 400	2 580	2 270	88
KM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.49	1 050	201	205	102
MGM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	16	1 160	180	182	101
NAM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	7	319	36	37	104
ALM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	288	2 760	953	374	39
PSATM3 (%)	0.05	36	6	6	108
POX (mg.kg <sup>-1</sup> )	35	929	261	163	63
ALOX (mg.kg <sup>-1</sup> )	545	13 400	2 200	1 730	79
FEOX (mg.kg <sup>-1</sup> )	346	14 700	3 070	2 180	71
PSATOX (%)	0.58	47	8	6	80
PHEAU	4	8	6	0.70	11
PHCA	3	7	6	0.74	13
CORG (%)	0.55	17	3	2	85
CA (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.20	54	9	6	68
MG (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.02	9	2	2	96
K (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.03	1	0.29	0.22	75
NA (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.01	3	0.18	0.25	140
CEC (cmol.kg <sup>-1</sup> )	4	70	18	10	56
PBR2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	16	451	87	62	71
ATOT (%)	2	73	19	14	73
STOT (%)	1	91	51	24	49

Tableau 3.13: Statistiques descriptives du sous-sol (horizon B)

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation
PSI	15	1 840	259	232	90
PW (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.00	8	2	2	97
PM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.04	99	16	21	137
CUM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.33	12	2	2	95
MNM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.61	115	23	25	108
FEM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	57	473	208	92	44
CAM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.69	7 290	1 780	1 680	94
KM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	5	1 980	212	337	159
MGM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	13	1 250	243	301	124
NAM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	4	398	55	67	120
ALM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	63	2 590	954	520	54
PSATM3 (%)	0.01	12	2	2	109
POX (mg.kg <sup>-1</sup> )	34	1 110	223	182	82
ALOX (mg.kg <sup>-1</sup> )	81	14 150	2 330	2 670	115
FEOX (mg.kg <sup>-1</sup> )	147	11 100	2 820	1 810	64
PSATOX (%)	0.22	21	7	5	65
PHEAU	5	8	7	0.80	12
PHCA	4	7	6	0.81	14
CORG (%)	0.05	6	0.62	0.85	137
CA (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.10	19	7	5	80
MG (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.01	14	3	3	122
K (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.02	2	0.22	0.22	100
NA (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.01	3	0.23	0.40	173
CEC (cmol.kg <sup>-1</sup> )	2	41	14	9	65
PBR2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	3	224	77	43	56
ATOT (%)	2	81	23	22	96
STOT (%)	0.60	96	51	32	63

Tableau 3.14: Statistiques descriptives du substratum (horizon C)

Variables	Minimum	Maximun	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation
PSI	6	745	194	121	63
PW (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.00	21	2	2	111
PM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.01	340	13	36	285
CUM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.25	13	3	3	80
MNM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.14	219	45	42	93
FEM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	102	434	206	76	37
CAM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	31	19 500	3 630	3 290	91
KM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	0.74	1 510	297	355	120
MGM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	8	1 460	399	371	93
NAM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	6	1 110	109	157	144
ALM3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	23	1 770	595.	416	70
PSATM3 (%)	0.00	76	3	8	297
POX (mg.kg <sup>-1</sup> )	40	840	322	187	58
ALOX (mg.kg <sup>-1</sup> )	89	6 600	1 500	1 070	71
FEOX (mg.kg <sup>-1</sup> )	154	7 330	2 330	1 200	51
PSATOX (%)	1	32	12	5	43
PHEAU	5	9	7	0.80	11
PHCA	5	8	7	0.86	13
CORG (%)	0.00	5	0.21	0.44	210
CA (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.10	28	12	8	65
MG (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.01	13	4	3	84
K (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.01	1	0.35	0.26	75
NA (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.01	6	0.44	0.78	176
CEC (cmol.kg <sup>-1</sup> )	3	38	16	10	61
PBR2 (mg.kg <sup>-1</sup> )	2	226	87	51	59
ATOT (%)	0.20	87	34	27	79
STOT (%)	0.00	99	34	33	97

Pour pouvoir utiliser la majorité des méthodes statistiques multivariées, la distribution de chacune des variables doit être conforme à celle de la loi normale. Le test le plus simple pour vérifier la normalité, consiste à tracer, sur du papier gradué selon la loi normale, les fréquences relatives cumulées d'une variable. Sur un tel graphique, la courbe normale est représentée par une droite. Pour accepter la normalité, l'alignement des points doit être raisonnablement rectiligne et s'approcher de la droite normale, ajustée à partir de la

moyenne et de l'écart-type des données. Les graphes de la distribution des variables PSI et STOT sont présentés à la figure 3.4. Le graphe de PSI semble démontrer que l'hypothèse de normalité est plus ou moins bien vérifiée. Cette méthode comporte cependant une certaine forme de subjectivité, puisque la différence entre la distribution normale et les fréquences cumulées est évaluée qualitativement [Legendre et Legendre, 1979].

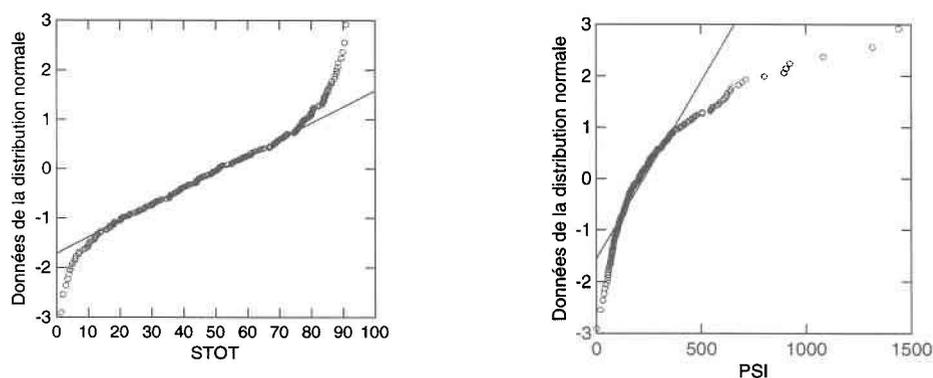


Figure 3.4: Représentation graphique de la distribution des variables PSI et STOT de la couche de surface sur un papier normal

Pour compléter cette méthode, deux autres indices ont aussi été utilisés pour vérifier la normalité des données: les indices d'aplatissement (G1) et d'asymétrie (G2). L'indice G1 est le plus communément utilisé pour vérifier la normalité des propriétés du sol [Webster et Oliver, 1990]. Il mesure la symétrie de la distribution de l'échantillon tandis que G2 mesure plutôt le degré de similitude avec la courbe en forme de cloche de la loi normale. Ces deux mesures sont centrées à zéro et ces indices sont associés à une mesure d'erreur que l'on peut utiliser pour accepter ou rejeter l'hypothèse de normalité des données. Une valeur de G1 ou G2 est considérée comme extrême si l'intervalle, produit par plus au moins deux fois l'erreur associée à ces paramètres, n'inclut pas le zéro. Après avoir vérifié la normalité des données, les variables ne présentant pas une distribution normale ont subi une

transformation logarithmique pour les rendre conformes. Cette transformation s'est avérée la plus efficace pour atteindre cet objectif. Une comparaison des indices G1 et G2 pour chacune des variables brutes et transformées, des horizons A, B et C, est représentée à l'Annexe C. Les variables ATOT et STOT n'ont pas subi de transformation logarithmique, puisqu'elles conservent une distribution des données près de la loi normale dans chacun des horizons. À noter aussi que PHEAU et PHCA constituent déjà des transformations logarithmiques de la concentration des ions  $H^+$  dans la solution du sol.

Le Tableau 3.15 énumère l'ensemble des variables pour chaque horizon, ayant fait l'objet d'une transformation logarithmique. Certaines variables après transformation étaient légèrement éloignées de la distribution normale; on les a quand même conservées pour les analyses multivariées, puisque la plupart des techniques d'analyse multivariée offrent une certaine robustesse aux écarts à la multinormalité.

Les corrélations simples de Pearson entre les différentes propriétés transformées et les indicateurs relatifs à la composante phosphore ont été calculées pour identifier les relations qui existent entre elles. Pour connaître le niveau de signification de chacune des corrélations, le test de Student a été appliqué et par la suite la correction Bonferroni [Systat, 1997]. Pour mieux interpréter les différents liens existants entre ces variables, des analyses statistiques multivariées ont été employées par la suite.

Tableau 3.15: Liste des variables transformées

Variables transformées	
PSI→Ln(PSI)	ALM3→Ln(ALM3+1), horizon A Ln(ALM3), horizon B et C
PW→Ln(PW+1)	POX→Ln(POX)
CEC→Ln(CEC)	ALOX→Ln(ALOX)
PM3→Ln(PM3)	FEOX→Ln(FEOX)
CUM3→Ln(CUM3)	CORG→Ln(CORG+1)
FEM3→Ln(FEM3)	CA→Ln(CA+1)
CAM3→Ln(CAM3)	MG→Ln(MG+1)
MNM3→Ln(MNM3)	K→Ln(K+1)
KM3→Ln(KM3+1), horizon A et C Ln(KM3), horizon B	NA→Ln(NA+1)
MGM3→Ln(MGM3+1)	PBR2→Ln(PBR2)
NAM3→Ln(NAM3)	

Ln: logarithme népérien

### 3.4 Analyse multivariée

Chacune des analyses statistiques a été effectuée séparément sur les 3 couches de sol. L'ensemble des analyses statistiques a été effectué avec le logiciel de statistiques SYSTAT version 7.0.1 [Systat, 1997]. Les méthodes statistiques employées pour le regroupement des sols et la séquence d'utilisation sont présentées à la figure 3.5. D'abord une analyse en composantes principales a été effectuée pour réduire la matrice des données à un nombre restreint de dimensions orthogonales facilement interprétables et pour identifier les descripteurs de sol ayant le plus d'importance. Par la suite, l'utilisation du pointage des composantes a servi de matrice de données pour la classification hiérarchique des échantillons. Ceci permet de conserver le maximum d'information contenue dans la matrice originale des données sans effet de redondance d'information. Des groupes homogènes de sols ont ainsi été formés à l'aide d'une analyse en grappe (*cluster analysis*). L'interprétation des groupements a été effectuée par une analyse de variance et par des représentations graphiques des caractéristiques de sols sélectionnées sur les principaux axes factoriels. Une

série d'analyses discriminantes ont été réalisées sur l'ensemble et sur des sous-ensembles des descripteurs pour connaître les analyses les plus efficaces dans la définition des groupes. Cette technique a servi également à dériver des équations de classification afin d'attribuer tous les sols non étudiés de la région aux groupes appropriés.

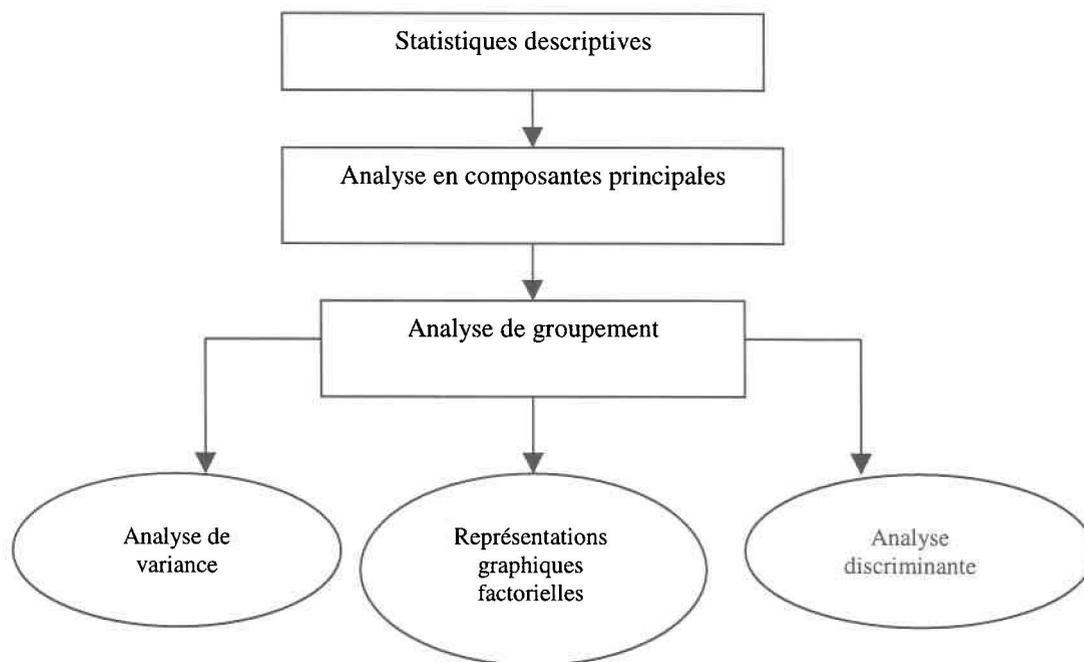


Figure 3.5: Schéma des méthodes statistiques utilisées pour le regroupement des sols

### 3.4.1 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) permet en premier lieu de qualifier les relations qui existent entre variables et individus dans une matrice de données. Elle consiste à regrouper un nombre élevé de variables corrélées entre elles par des variables synthétiques (composantes) indépendantes les unes des autres. Les composantes les plus importantes seront retenues pour expliquer à elles seules la majorité de la variance contenue dans les données [Sharma, 1996]. L'ACP facilite l'interprétation des données par la projection des variables ou individus dans un sous-espace de deux ou trois dimensions. L'analyse en

composantes principales a été utilisée dans diverses études pédologiques. Dans l'étude, les composantes principales ont été extraites à partir d'une matrice de corrélation. Puisque les variables décrivant les sols ont des unités de mesures différentes, l'analyse effectuée sur la matrice de corrélation permet d'éliminer les effets des différentes unités dans la détermination des saturations (*loading*) [James et McCulloch, 1990; Johnson et Wichern, 1992]. De plus, cela rend les variables directement comparables [Dillon et Goldstein, 1984]. Pour déterminer le nombre de composantes retenues permettant de conserver le maximum d'information de la matrice des données initiales, divers outils sont disponibles. Plusieurs utilisent l'approche qui consiste à conserver les valeurs propres plus grandes que 1. Le but est de conserver le nombre d'axes dont la part de variation expliquée est supérieure ou égale à celle d'une seule variable initiale [Kaiser, 1958]. Une alternative à cette approche, est l'utilisation du test du talus (*scree test*) qui consiste à représenter graphiquement en ordre d'extraction les valeurs propres de chacune des composantes [Cattell, 1966]. Le tracé du graphique représente généralement une droite avec une forte pente pour les premières composantes, suivie d'une zone de transition représentée par une région avec une pente plus faible. Le nombre de composantes retenues est donné par le point d'inflexion pour lequel les composantes sont au dessus de la droite de pente faible formée par les plus petites valeurs propres. Il est suggéré que le nombre de composantes retenues correspondent au nombre situé juste avant que la droite de pente faible ne débute. Dans cette recherche, le test du talus a été préféré à la règle de Kaiser pour déterminer le nombre de composantes retenues.

Les composantes retenues ont été interprétées par l'examen des saturations. Les pointages des composantes conservées pour fin d'interprétation ont été utilisés pour effectuer le groupement hiérarchique. Ces pointages ont, par la suite, servi à l'interprétation des groupements obtenus par représentation graphique et ordination des pointages dans l'espace réduit défini par les composantes sélectionnées.

### 3.4.2 Groupement hiérarchique

La méthode de groupement utilisée est du type agglomérative hiérarchique et polythétique. Avec une analyse de groupement, les objets sont placés dans les groupes selon la similarité qu'il y a entre les mesures. Il s'effectue une réduction des données qui provient de la formation de  $g$  groupes parmi les  $n$  objets. Les résultats sont représentés par un dendogramme, un arbre hiérarchique à deux dimensions démontrant les liaisons entre les objets. [James et McCulloch, 1990]. Dans une classification hiérarchique de type agglomératif, les objets sont associés à de petits groupes, et ensuite les petits groupes sont associés à de plus grands et ainsi de suite. Les méthodes agglomératives procèdent par la formation d'une série de fusions des  $n$  objets dans des groupes. Les méthodes d'agglomération sont construites par l'emploi de mesures de similarité (ou de dissimilarité) entre les objets. Une mesure est choisie pour représenter la relation entre les objets et les valeurs de distance seront calculées pour toutes les paires d'objets afin de former une matrice de similarité. Basée sur les pointages des composantes standardisées, la distance euclidienne entre chaque paire d'objets a été calculée pour la formation de la matrice de similarité.

L'analyse de groupement de l'étude a été réalisée à partir de la méthode agglomérative de Ward [Ward, 1963], une technique de groupement classique et utilisée dans plusieurs études portant sur les sols. Cette méthode vise à minimiser la somme des carrés de l'erreur, c'est-à-dire la somme de la distance au carré entre les objets et le centroïde de leurs groupes [Webster et Oliver, 1990; Dillon et Goldstein, 1984]. Certains chercheurs ont démontré les avantages d'utiliser une analyse en composantes principales avant l'emploi d'une analyse de groupement [Cuanalo et Webster, 1970]. L'analyse en composantes principales réduit le grand nombre de variables à quelques composantes avec une perte d'information minimale [Norris, 1971]. En utilisant un tableau de facteurs, on diminue les bruits de fond attribuables aux fluctuations d'échantillonnage ou à l'imprécision de la mesure [Jambu, 1976]. Pour analyser le dendogramme, une limite de similarité a été choisie en optant pour un niveau où une discontinuité de similarité entre groupes de sols se formait dans la

structure hiérarchique. Cette technique suit la même approche que le test du talus (*scree test*) [Cattell, 1966]. On représente graphiquement les valeurs de similarité des différents niveaux de fusion des groupements tout le long de la structure hiérarchique du dendogramme [Sheard et Geale, 1983]. L'observation de la pente du graphique indique qu'une rupture se produit lorsque deux groupes dissemblables se fusionnent alors qu'un changement léger de la pente traduit la fusion de groupes similaires. Le choix d'un niveau optimum de groupement est possible en optant pour un niveau de rupture supérieur.

### **3.4.3 Analyse discriminante**

L'analyse discriminante est apparentée à l'analyse de variance multivariée (MANOVA) et à la régression multiple. L'analyse de variance multiple a pour but de déterminer si les groupes mesurés sur plusieurs variables présentent une différence statistiquement significative quant à leurs centroïdes [Laforge, 1973]. Dans l'analyse discriminante, le test statistique utilisé, le lambda de Wilks, est le même que pour une MANOVA. En plus de tester les différences entre les groupes, l'analyse discriminante peut être utilisée pour identifier les variables les plus efficaces pour discriminer entre les groupes et pour classifier de nouveaux individus à l'intérieur de ces groupes.

Dans notre étude, chacun des groupes a été caractérisé par des équations de classification générées par une analyse discriminante étape par étape. Les variables incluses dans le modèle ont été sélectionnées par la méthode Forward [Seber, 1984]. La première étape de cette méthode consiste à effectuer une simple ANOVA parmi les sols pour chaque propriété de sol et à sélectionner celle qui montre la plus grande valeur du critère de signification de Fischer (F). Celle qui maximise la distance de Mahalanobis séparant le centroïde de chaque groupe. Dans une étape suivante, une nouvelle ANOVA est effectuée, en utilisant les résidus du modèle précédent; la variable avec la plus grande valeur de F est, par la suite, incorporée au modèle, la valeur critique de F étant de 4. Cette opération est répétée tant et aussi longtemps que les variables ajoutées au modèle ont un pouvoir discriminant significatif. Si le modèle sélectionne plus de 2 variables, il est nécessaire de définir des variables

---

canoniques, lesquelles représentent, dans un espace donné, la distribution des sols étudiés comme une fonction à plusieurs variables [Quiroga et *al.*, 1998].

#### **3.4.4 Analyse de variance**

Une analyse de variance a été exécutée sur l'ensemble des groupes pour chacune des propriétés de sols en utilisant le critère de signification de Fisher. Celui-ci indique s'il y a présence d'une différence significative entre les moyennes des groupes pour une variable donnée. Par contre, il ne peut montrer quelle moyenne diffère significativement des autres. Par contre, l'utilisation de la méthode de Tukey [Miller, 1985] rend possible la comparaison multiple de moyennes de groupes et vérifie si elles sont significativement différentes les unes des autres. La moyenne et le coefficient de variation des variables ont été calculés pour les regroupements formés pour chacun des horizons de sols. La moyenne géométrique a été effectuée sur les données ayant subi une transformation logarithmique. Pour aider à l'interprétation, les valeurs des moyennes ont été retransformées en valeurs brutes originales.

## 4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

---

### 4.1 Groupement effectué sur les types de sol à partir des descripteurs de la couche de surface

#### 4.1.1 Relation entre les variables étudiées

L'examen des coefficients de corrélation de la couche de surface, exposés dans le tableau 4.1, a permis de connaître davantage les relations existantes entre les variables, en particulier, celles touchant la capacité de fixation et le degré de saturation en P. La variable PSI, représentant la capacité de fixation du P, est corrélée de façon significative et positive, avec ALOX, FEOX, CEC, CORG, ALM3 et ATOT. Les coefficients de corrélation sont sensiblement plus élevés entre PSI et les variables ALOX et FEOX qu'entre PSI et ALM3. La contribution des sesquioxydes de fer à la fixation du P n'est pas pris en compte dans l'indice FEM3. Ceci confirme que la capacité de fixation du sol en P peut être bien estimée par les teneurs en Fe et Al extractibles à l'oxalate d'ammonium [Ballard et Fiskell, 1974; Saunders, 1965; Yuan et Breland, 1969; Van der Zee et Van Riemsdijk, 1986; Simard et *al.*, 1994] comparativement à l'aluminium extrait par Mehlich III [Giroux et Tran, 1996]. On constate aussi la contribution des sesquioxydes de fer et d'aluminium, de la matière organique et de la texture dans la capacité de fixation du P dans les sols. La variable PW, exprimant le contenu en P soluble, peut être considérée comme un indice de désorption du P si elle est liée avec un indice de saturation ou PSI [Beauchemin et *al.*, 1996]. Elle est corrélée positivement et significativement avec les variables PSATM3, PBR2, PSATOX, PM3, POX, K, PHCA et PHEAU. L'effet de la surfertilisation déduite à partir des valeurs élevées en PM3, PBR2 et K de la couche de surface peut expliquer les valeurs élevées de PW. En effet, l'addition d'engrais phosphaté et potassique au-delà des besoins des récoltes contribue à long terme à l'accumulation de ces éléments dans le sol [Hartikainen, 1991].

Une partie de ceux-ci sont fixés par le sol (POX), une partie est lessivée (cas du K en sols légers). Lorsque le sol devient saturé en P (PSATOX et PSATM3 élevé), il y a risque de désorption du P (PW élevé) qui devient disponible pour la plante ou peut être entraîné vers les drains (lessivage, percolation, écoulement préférentiel) ou les eaux de surface (ruissellement, écoulement hypodermique). La connaissance du degré de saturation du sol et/ou de la teneur en PW permettrait de mieux tenir compte de la contribution potentielle des sols aux besoins réels en engrais phosphatés des cultures et réduirait ainsi les risques de pollution environnementale. La corrélation de PW avec PM3 et PBR2 est plus forte qu'avec l'indicateur POX. Alors que PM3 et PBR2 sont des indicateurs du P disponible, POX est un indicateur du P fixé plus fortement aux minéraux amorphes de Fe et d'Al comme le démontre sa relation avec ATOT, FEOX, ALOX et PSI. De plus la variable POX est reliée aux variables indicatrices de la fertilité et de la teneur en argile du sol telles que CUM3, K, MGM3, PSATOX, CEC et CAM3. La variable ALM3 est liée négativement avec le pH du sol. La variable ALOX est liée positivement à la matière organique, à la C.E.C. et l'argile. La variable FEOX est plus liée à la teneur en argile et à la C.E.C. que ALOX. Les indices du degré de saturation en P sont liés positivement aux variables PW, PBR2, PM3, POX et PHCA. Ils ont une relation négative avec les variables PSI, FEOX, ALOX et ALM3, indicateurs de fixation alors que les variables précédentes sont des indicateurs de disponibilité et de désorption en P. Ces deux groupes de variables sont à la fois des indicateurs de fixation et indicateurs de désorption en P. En comparant les deux indices de saturation, on observe que l'indice PSATOX est mieux corrélé avec PSI alors que PSATM3 à une meilleure relation avec les indicateurs de P disponible.

Tableau 4.1: Coefficients de corrélation de Pearson de la couche de surface entre les propriétés du sol et les indicateurs relatifs au phosphore.

Variables	PSI	PW	PM3	AIM3	POX	ALOX	FEOX	PBR2	PSATM3	PSATOX
PSI	1.00	-0.34 ***	-0.07	0.48 ***	0.26 **	0.76 ***	0.61 ***	-0.26 ***	-0.28 ***	-0.46 ***
PW	-0.34 ***	1.00	0.53 ***	-0.33 ***	0.43 ***	-0.28 ***	-0.28 ***	0.63 ***	0.67 ***	0.62 ***
PM3	-0.07	0.53 ***	1.00	0.04	0.43 ***	0.03	-0.22 **	0.72 ***	0.72 ***	0.41 ***
CUM3	0.16	0.24 **	0.04	-0.05	0.52 ***	0.21	0.15	0.25 **	0.07	0.16
MNM3	0.06	0.18	-0.07	-0.06	0.45 ***	0.04	0.54 ***	0.03	0.03	0.09
FEM3	0.04	0.10	0.06	0.17	0.23 *	-0.14	0.20	0.05	0.04	0.20 *
CAM3	0.20	0.18	-0.12	-0.19	0.42 ***	0.12	0.28 ***	0.03	0.00	0.10
KM3	0.16	0.19	-0.11	-0.01	0.42 ***	0.10	0.29 ***	0.01	-0.00	0.13
MGM3	0.19	0.37 ***	0.14	-0.11	0.48 ***	0.14	0.21	0.27 ***	0.21 *	0.18
NAM3	0.38 ***	0.08	-0.17	0.02	0.37 ***	0.25 **	0.37 ***	-0.07	-0.07	-0.00
ALM3	0.48 ***	-0.33 ***	0.04	1.00	0.16	0.64 ***	0.43 ***	-0.16	-0.42 ***	-0.37 ***
POX	0.26 **	0.43 ***	0.43 ***	0.16	1.00	0.37 ***	0.41 ***	0.52 ***	0.34 ***	0.45 ***
ALOX	0.76 ***	-0.28 ***	0.03	0.64 ***	0.37 ***	1.00	0.63 ***	-0.16	-0.26 ***	-0.44 ***
FEOX	0.61 ***	-0.28 ***	-0.22 *	0.43 ***	0.41 ***	0.63 ***	1.00	-0.35 ***	-0.34 ***	-0.41 ***
PHEAU	-0.23 *	0.29 ***	0.05	-0.42 ***	0.19	-0.20	-0.09	0.25 **	0.24 ***	0.22 **
PHCA	-0.18	0.31 ***	0.08	-0.43 ***	0.26 **	-0.16	-0.07	0.27 ***	0.26 ***	0.24 ***
CORG	0.53 ***	-0.10	-0.02	0.31 ***	0.22 *	0.51 ***	0.23 *	-0.11	-0.16	-0.18
CA	0.24 **	0.15	-0.13	-0.17	0.41 ***	0.16	0.29 ***	0.02	-0.03	0.05
MG	0.30 ***	0.18	-0.19	-0.09	0.44 ***	0.21	0.39 ***	-0.03	-0.07	0.02
K	0.12	0.41 ***	0.28 ***	0.03	0.51 ***	0.19	0.16	0.34 ***	0.30 ***	0.28 ***
NA	0.30 *	-0.07	-0.11	0.08	0.16	0.24 *	0.24 **	-0.14	-0.10	-0.09
CEC	0.57 ***	-0.01	-0.19	0.21	0.45 ***	0.49 ***	0.56 ***	-0.16	-0.23 ***	-0.17
PBR2	-0.26 ***	0.63 ***	0.72 ***	-0.16	0.52 ***	-0.16	-0.35 ***	1.00	0.68 ***	0.61 ***
ATOT	0.37 ***	0.08	-0.26 **	0.06	0.43 ***	0.28 ***	0.51 ***	-0.16	-0.19	-0.06
STOT	-0.37 ***	-0.09	0.26 **	0.02	-0.44 ***	-0.23 *	-0.57 ***	0.15	0.15	0.05

\*, \*\*, \*\*\* niveaux de signification dans l'ordre P=0.05, P=0.01 et P=0.001, respectivement (n=277)

### 4.1.2 Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales a été effectuée sur la matrice de corrélation des vingt-cinq variables. Les différentes valeurs propres et le pourcentage de la variance expliquée pour chacune des composantes extraites sont présentés au tableau 4.2. La valeur propre d'une composante correspond à la somme des variances des différentes variables expliquées par celle-ci. Les premières composantes expliquent à elles seules une grande part de la variabilité de la matrice de données. Le nombre de composantes interprétables a été déterminé à partir du test du talus (*scree test*) (Figure 4.1).

Tableau 4.2: Différentes valeurs propres des composantes et pourcentage de la variance expliquée et cumulative.

Composantes	Valeurs propres	Variance (%)	
		expliquée	cumulée
1	8.65	34.61	34.61
2	4.19	16.75	51.36
3	2.61	10.46	61.81
4	1.57	6.28	68.09
5	1.13	5.00	73.09
6	1.06	4.25	77.34
7	0.89	3.57	80.90
8	0.77	3.10	84.00
9	0.65	2.62	86.62
10	0.56	2.25	88.87
11	0.47	1.86	90.73
12	0.39	1.54	92.27
13	0.33	1.32	93.59
14	0.27	1.08	94.67
15	0.24	0.97	95.65
16	0.19	0.77	96.42
17	0.19	0.76	97.18
18	0.16	0.63	97.81
19	0.12	0.50	98.31
20	0.11	0.42	98.73
21	0.10	0.40	99.13
22	0.08	0.30	99.43
23	0.07	0.29	99.72
24	0.04	0.17	99.89
25	0.03	0.11	100.00

La figure 4.1 a permis de déduire que 4 composantes, situées au dessus du point d'inflexion de la courbe, suffisent pour résumer l'information provenant de la matrice de données. Les autres composantes extraites n'ont pas été retenues, car elles ne représentaient pas une

dimension importante et pertinente pour l'étude. La variance totale expliquée par les 4 premières composantes est de 68 %, de celle définie par l'ensemble des descripteurs étudiés. L'interprétation des différentes composantes conservées s'est faite à partir de la matrice des saturations (Tableau 4.3). L'interprétation des saturations d'une composante est facilitée si la contribution d'une variable est élevée pour une composante et faible pour les autres. Il est ainsi plus facile de déceler la structure interne de l'ensemble des variables étudiées et de qualifier chaque composante selon le facteur pédologique qu'elle représente.

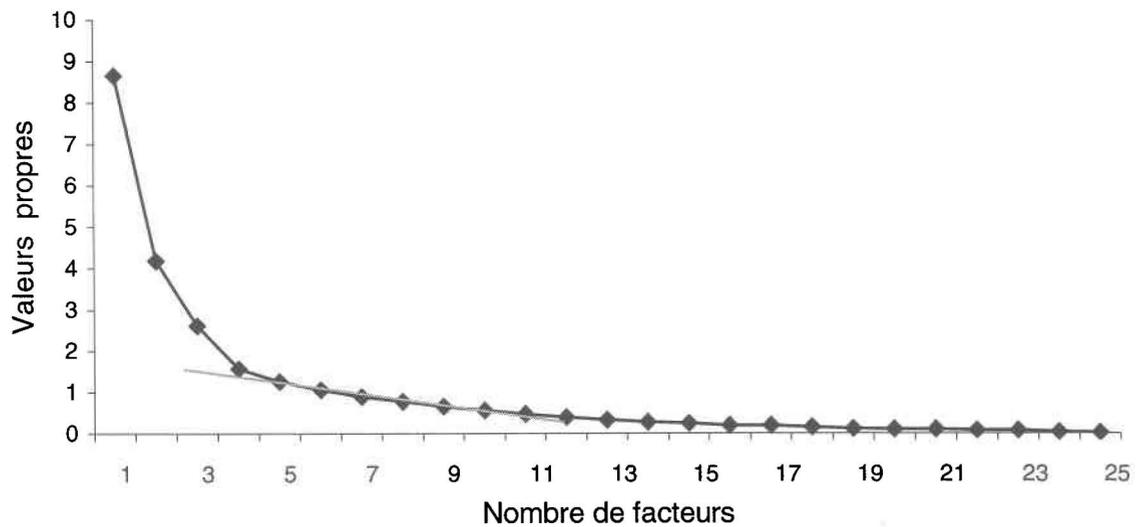


Figure 4.1: Solution graphique du test du talus (*scree test*) de Cattell pour déterminer le nombre de composantes interprétables.

Tableau 4.3: Matrice des saturations des composantes conservées.

Variables	Composantes		
	1	2	3
1 ATOT	0.83	-0.13	-0.14
2 STOT	-0.86	0.10	0.19
3 PSI	0.44	-0.68	0.22
4 PW	0.20	0.70	0.40
5 CEC	0.87	-0.29	-0.02
6 PM3	-0.09	0.42	0.76
7 CUM3	0.68	0.20	0.10
8 FEM3	0.23	-0.06	0.22
9 CAM3	0.83	0.21	-0.25
10 MNM3	0.52	0.09	-0.04
11 KM3	0.71	0.05	-0.04
12 MGM3	0.64	0.25	0.20
13 NAM3	0.70	-0.11	-0.09
14 ALM3	0.03	-0.67	0.44
15 POX	0.64	0.17	0.58
16 ALOX	0.37	-0.65	0.38
17 FEOX	0.55	-0.58	0.07
18 PHEAU	0.42	0.64	-0.34
19 PHCA	0.48	0.64	-0.30
20 CORG	0.41	-0.40	0.21
21 CA	0.84	0.18	-0.25
22 MG	0.88	0.02	-0.13
23 K	0.52	0.23	0.44
24 NA	0.41	-0.21	-0.07
25 PBR2	0.04	0.66	0.62

Les variables CA, MG, CEC, STOT, ATOT, CAM3 et KM3 expliquent bien la première composante principale et sont liées à la texture et aux éléments associés à la fertilité intrinsèque du sol (Nolin et *al.*, 1989). D'autres variables comme FEOX, PHCA et PHEAU expliquent une partie de la première composante principale bien qu'elles caractérisent surtout la deuxième composante. La variable POX, en plus d'être associée à la première composante, comme le démontre la relation (coefficient de corrélation de Pearson) avec ATOT et CEC, elle qualifie également la troisième composante. La deuxième composante semble bien caractérisée par les variables PW, PSI, ALM3 et ALOX. La variable PBR2 en plus d'être bien représentée par la deuxième composante, caractérise aussi la troisième. Les descripteurs de sol expliquant la deuxième composante sont reliés à la capacité de fixation et à l'intensité de la désorption du P dans les sols. Cette composante devrait donc jouer un rôle important dans la formation des groupes de sols. La troisième composante est expliquée par les variables exprimant la disponibilité du P. Seule la variable FEM3 est peu

impliquée dans la caractérisation des trois premières composantes. Bien que FEM3 explique la 4<sup>ème</sup> composante, celle-ci n'a pas été retenue ni pour le groupement ni pour l'interprétation car elle était non pertinente pour l'étude comme le démontre l'analyse de corrélation de Pearson (Tableau 4.1). En outre, l'examen de la matrice des saturations démontre que les deux premières composantes expriment le comportement intrinsèque des sols comme la fertilité et la capacité de fixation du P, alors que la troisième fait plutôt ressortir l'effet de l'aménagement et la gestion, plus particulièrement de la fertilisation organique ou minérale, sur ces caractéristiques intrinsèques. Ainsi, seules les deux premières composantes ont été conservées pour des fins d'interprétation en groupes de fertilité en vue d'effectuer le classement des types de sols. La troisième composante a été utilisée seulement pour l'interprétation des groupes de sols. Les deux premières composantes représentent, à elles seules, 51 % de la variance totale, définie par l'ensemble des descripteurs étudiés.

Les figures 4.2 et 4.3 offrent des projections graphiques des saturations des composantes dans un espace délimité soit par les deux premières composantes ou la première et la troisième composantes. La position des descripteurs, dans l'espace réduit, permet de déterminer la contribution négative ou positive des variables le long de l'axe-composante. Les variables expliquant la première composante sont liées à la texture et au degré de fertilité du sol, par conséquent les types de sols sableux occupent la partie négative de l'axe, les types de sols loameux la partie centrale (près de zéro) et les types de sols argileux la partie positive. Les descripteurs expliquant la seconde composante permettent de séparer les types de sols fixateurs de P (partie négative de l'axe), des types de sols moins fixateurs (partie positive) et plus enclins à la désorption (haute teneur en PW). La troisième composante permet de distinguer les sols selon leur niveau de disponibilité en P. On remarque que les types de sols loameux situés dans la partie centrale de la première composante sont plus sujets à présenter un contenu en phosphore disponible plus élevé que les sols sableux ou argileux.

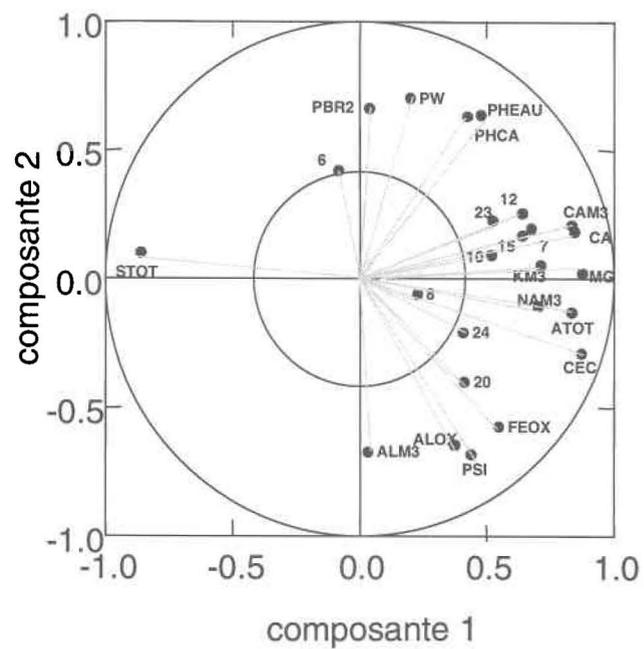


Figure 4.2: Représentation des variables dans le plan défini par les deux premières composantes. (Consulter le tableau 4.3 pour connaître le symbole numérique des variables)

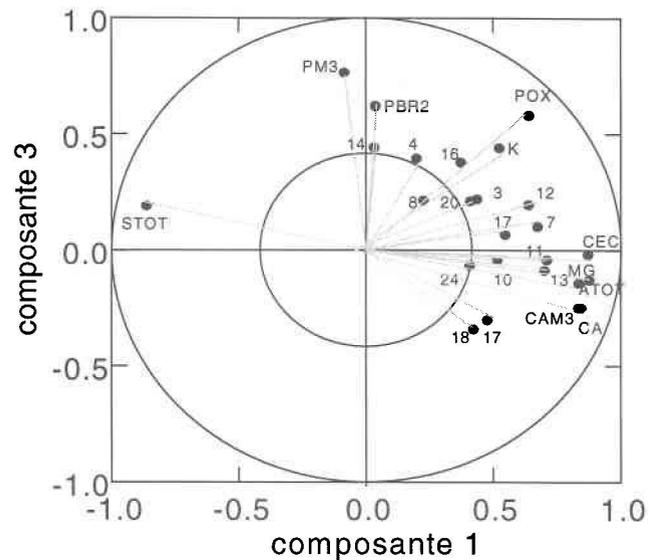


Figure 4.3: Représentation des variables dans le plan défini par la première et troisième composantes. (Consulter le tableau 4.3 pour connaître le symbole numérique des variables)

### 4.1.3 Classification hiérarchique

Les résultats de la méthode de classement sont présentés à la figure 4.4 dans un dendogramme simplifié. La liste des différents types de sols présents dans chacun des sous-classes, est présentée à l'Annexe D. La figure 4.5 représente graphiquement la distance euclidienne des différents niveaux de fusion des classes tout le long de la structure hiérarchique du dendogramme. Au moyen de la solution graphique définis par Sheard et Geale (1983), cinq groupes de types de sols sont retenus pour analyse. Le dendogramme démontre, au niveau de généralisation le plus élevé (distance euclidienne > 60), deux ensembles de sols distincts représentant la capacité de fixation du P, soit sous la branche

droite (groupes 5, 2 et 4), les types de sols fixateurs et, sous la branche gauche (groupes 3 et 1), les types de sols moins fixateurs et /ou plus enclins à la désorption. Le second niveau fait principalement ressortir la texture de la couche de surface et la genèse des sols tandis que le troisième niveau exprime la nature calcaire /non calcaire du substratum. Ainsi le troisième niveau de généralisation permet de subdiviser les 5 groupes de types de sols en 8 sous-groupes.

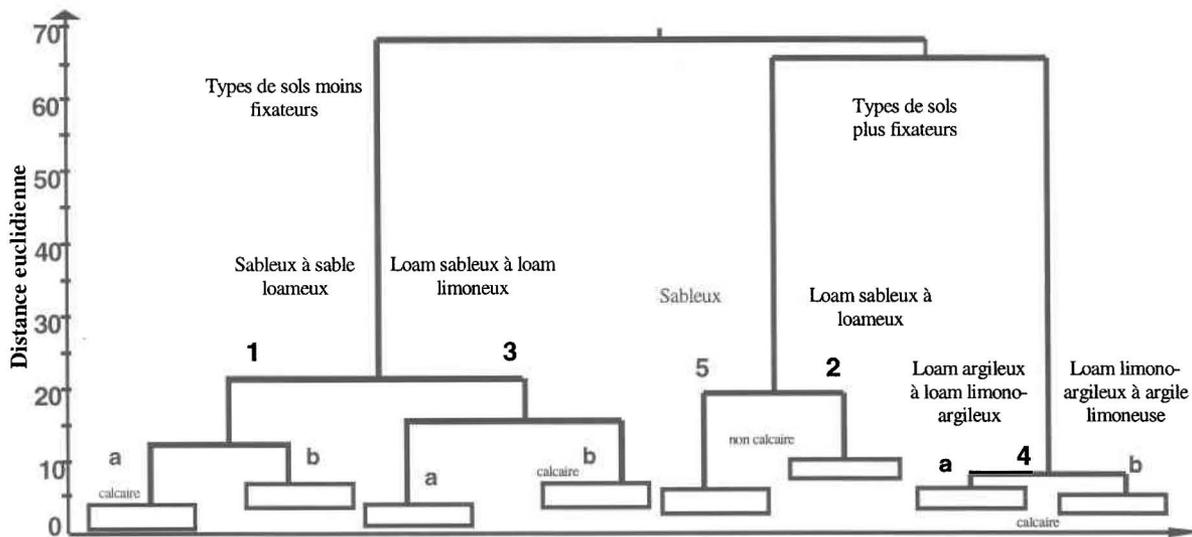


Figure 4.4: Dendrogramme simplifié de la classification hiérarchique des types de sols selon les caractéristiques de la couche de surface

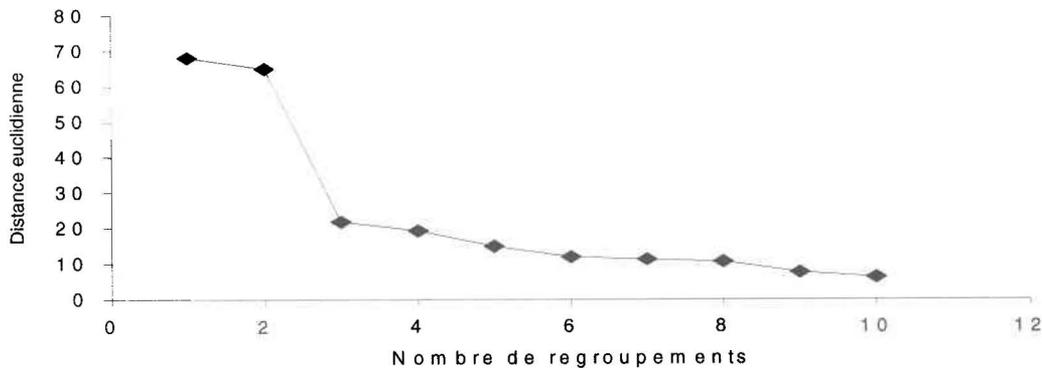


Figure 4.5: Solution graphique pour déterminer le nombre optimum de groupes

Les groupes de types de sols (Annexe D) formés ont des caractéristiques particulières telles que la texture de surface et la nature des horizons inférieurs reliées à la série de sol. Le groupe 1 peut être subdivisé en deux sous-groupes. Les types de sols appartenant au sous-groupe 1a ont des textures de surface majoritairement constituées de sable fin loameux et de loam sableux fin. Le sous-sol caractéristique de ces types de sol est sableux ou loameux. La majorité des sols appartenant à ce sous-groupe de fertilité ont un substratum calcaire et appartiennent à l'ordre des gleysols (horizon Bg). Le sous-groupe 1b est constitué de types de sols ayant sensiblement les mêmes textures de surface et du sous-sol. Il comporte cependant une plus faible proportion de sols ayant un substratum calcaire et une plus forte proportion de sols dont le sous-sol est enrichi en sesquioxydes de fer et d'aluminium entraîné par le processus de podzolisation (horizons Bfj et Bf).

Le groupe 2 contient des sols qui possèdent des textures de surface principalement constituée de loam sableux fin et de loam. Plusieurs de ces sols appartiennent à l'ordre des podzols et brunisols. Le sous-sol de ce groupe est caractérisé par des textures sableuses et loameuses. La majorité des substratums de ces sols sont non calcaires.

Le groupe 5 comprend une forte proportion des sols qui proviennent aussi de l'ordre des podzols et des brunisols. La texture de la couche de surface est, cependant plus sableuse que les sols du groupe 2; elle comprend principalement du sable loameux, du sable fin loameux et du loam sableux fin. Le sous-sol est constitué par des textures sableuses. Ces sols ont un substratum non calcaire.

Le groupe 3 peut être subdivisé en deux sous-groupes. Le sous-groupe 3a est caractérisé par des types de sols ayant des textures de surface de loam sableux et de loam argileux. Le sous-sol de ce sous-groupe a une texture loameuse à argileuse. Il n'y a pas de différence notable entre les types de sols provenant d'un substratum non calcaire ou calcaire. Le sous-groupe 3b comprend des types de sols avec une texture de surface de loam et de loam

limono-argileux. Le sous-sol présente également des textures loameuses à argileuses. Cependant, la plupart des sols possèdent un substratum calcaire.

Le groupe 4 peut, lui aussi, être subdivisé en deux sous-groupes. Les sols appartenant au sous-groupe 4a ont principalement des textures de surface de loam argileux et de loam limoneux argileux ainsi que de loam sableux fin humifère. Le sous-sol est qualifié par des textures argileuses à loameuses. La moitié des sols de ce groupe présentent un substratum calcaire. Le sous-groupe 4b englobe les sols avec des textures de surface d'argile limoneuse et de loam limono-argileux humifère. La texture du sous-sol est principalement argileuse. Une forte proportion des sols de ce groupe présentent un substratum calcaire. De plus, les types de sols présents dans les sous-groupes 4a et 4b appartiennent à l'ordre des gleysols.

Pour interpréter la partition du dendogramme et mettre en évidence les relations entre les groupes de types de sols et les descripteurs de sols, une superposition du dendogramme et d'une ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes a été réalisée. De plus, une analyse de variance a été effectuée sur les descripteurs de sols et a permis de cerner et de décrire les indicateurs de la qualité des sols qui présentent des différences significatives entre chacun des groupes.

#### **4.1.4 Interprétation des groupements**

##### **4.1.4.1 Ordination des pointages dans l'espace réduit défini par les composantes principales sélectionnées**

L'ordination des pointages dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes a mis en évidence les caractéristiques de sols (section 3.2.2), non utilisées dans l'analyse en composantes principales et le groupement, pour qualifier davantage chacun des sous-groupes. Les différentes propriétés de sol sélectionnées pour l'interprétation des regroupements sont représentées sur les deux principales composantes (Figures 4.6, 4.7 et 4.8).

La figure 4.6 a) représente la position des différents groupes et sous-groupes dérivés de l'analyse de groupement hiérarchique, dans l'espace réduit. À l'opposé, les sous-groupes 4b, 4a et 2 englobent les sols les plus fixateurs de P de cette région. Les sous-groupes 1b, 3a et 5 peuvent être qualifiés comme moyennement fixateurs. La figure 4.6 b) représente les diverses classes texturales des sols utilisées lors de la cartographie détaillée des sols au sud de la plaine de Montréal. La première composante permet de bien distinguer les textures des différents groupes et sous-groupes. Le groupe 5 possède les textures ayant le plus fort contenu en sable, viennent par la suite les sous-groupes 1a, 1b et 2 qui ont des textures s'approchant plus du loam sableux. Les textures loameuses plus riches en argile se retrouvent dans les sous-groupes 3a, 3b et 4a, ce dernier regroupant les sols plus argileux. Le sous-groupe 4b se situe à l'extrême droite de l'axe car il englobe les sols qui ont une texture d'argile limoneuse. Les sols humifères à cause de la contribution de la matière organique à la C.E.C., se retrouvent généralement dans les sous-groupes à texture plus lourde que celle déterminée par l'analyse granulométrique (4a et 4b).

La figure 4.7 a) permet de décrire l'horizon B de chacun des types de sols. On note que certaines séries ont une partie du sous-sol enrichi en sesquioxydes (Bfj) et appartiennent à l'ordre des gleysols car ils présentent des traces de gley dans les 50 premiers cm. Ces sols sont principalement répertoriées dans le groupe 2 et moindrement dans le groupe 5. Les sols ayant un horizon Bgf principalement actif dans le groupe 5 sont caractérisés par une accumulation d'oxyde de fer hydraté élevé. L'horizon podzolique Bf est principalement présent dans les groupes 2 et 5. La figure 4.7 b) permet de distinguer les groupes 5 et 2 des autres, puisqu'ils sont constitués en grande majorité par des sols appartenant aux grands groupes des podzols humiques et des podzols humo-ferriques et des brunisols sombriques. Ces sols présentent une capacité de fixation du P élevée comme l'indique leur position (inférieure gauche) dans l'espace réduit.

Les figures 4.8 a) et b) présentent le niveau de saturation en P de chacun des sols. Les indices du degré de saturation évalués à partir de l'extractif Mehlich semblent moins bien partitionnés dans l'ensemble que ceux déterminés à partir de l'extrait à l'oxalate d'ammonium. Les sous-groupes 4a, 4b et 2 contiennent les sols avec des indices du degré de saturation les plus faibles (0 - 5 %).

À l'opposé, les sous-groupes 1a et 3b, étant les moins fixateurs, contiennent des sols avec des indices de saturation de 10 % et plus. Ces sous-groupes sont situés dans la partie supérieure du second axe, ils sont plus sensibles à la désorption du P. Les sols des sous-groupes 3a et 1b et 5 ont des indices du degré de saturation en P modérés (5 - 10%).

#### **4.1.4.2 Analyse de variance**

Cette méthode statistique est utilisée pour comparer et indiquer s'il y a une différence significative entre les moyennes des différents groupes de sols formés par l'analyse de groupement hiérarchique. La comparaison des moyennes, provenant des variables employées pour la formation des groupements de sols, est exposée dans le tableau 4.4. Les figures 4.9 et 4.10 présentent les différentes moyennes pour chaque groupe et sous-groupe provenant des descripteurs reliés à la désorption et à la fixation en P. Chacune des moyennes énoncées ont été retransformées dans l'échelle originale des données

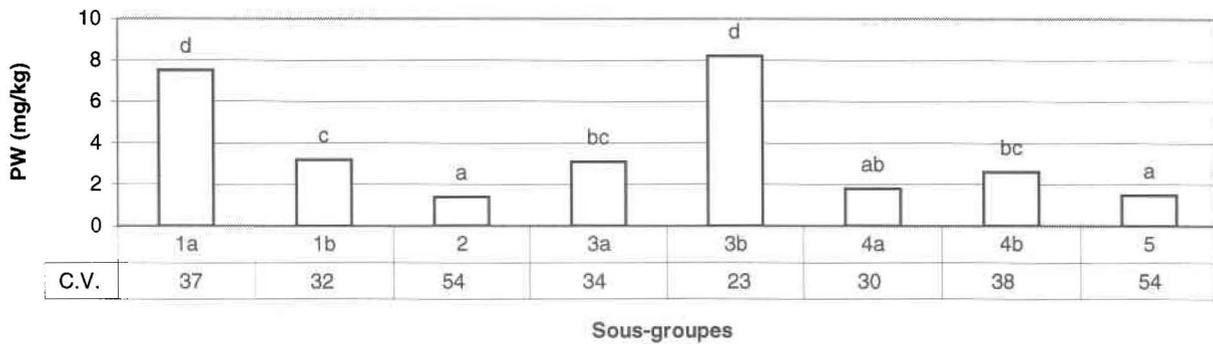


Figure 4.9: Teneurs moyennes du P soluble (PW) pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique.

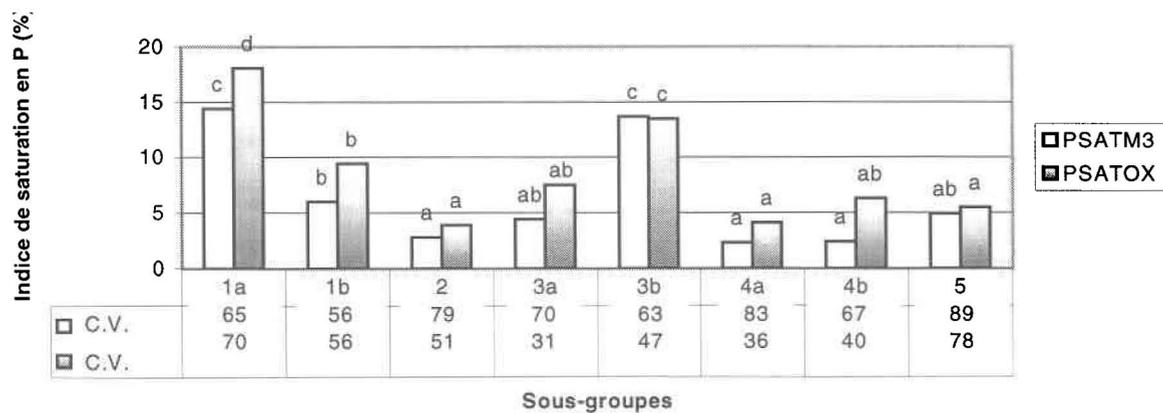
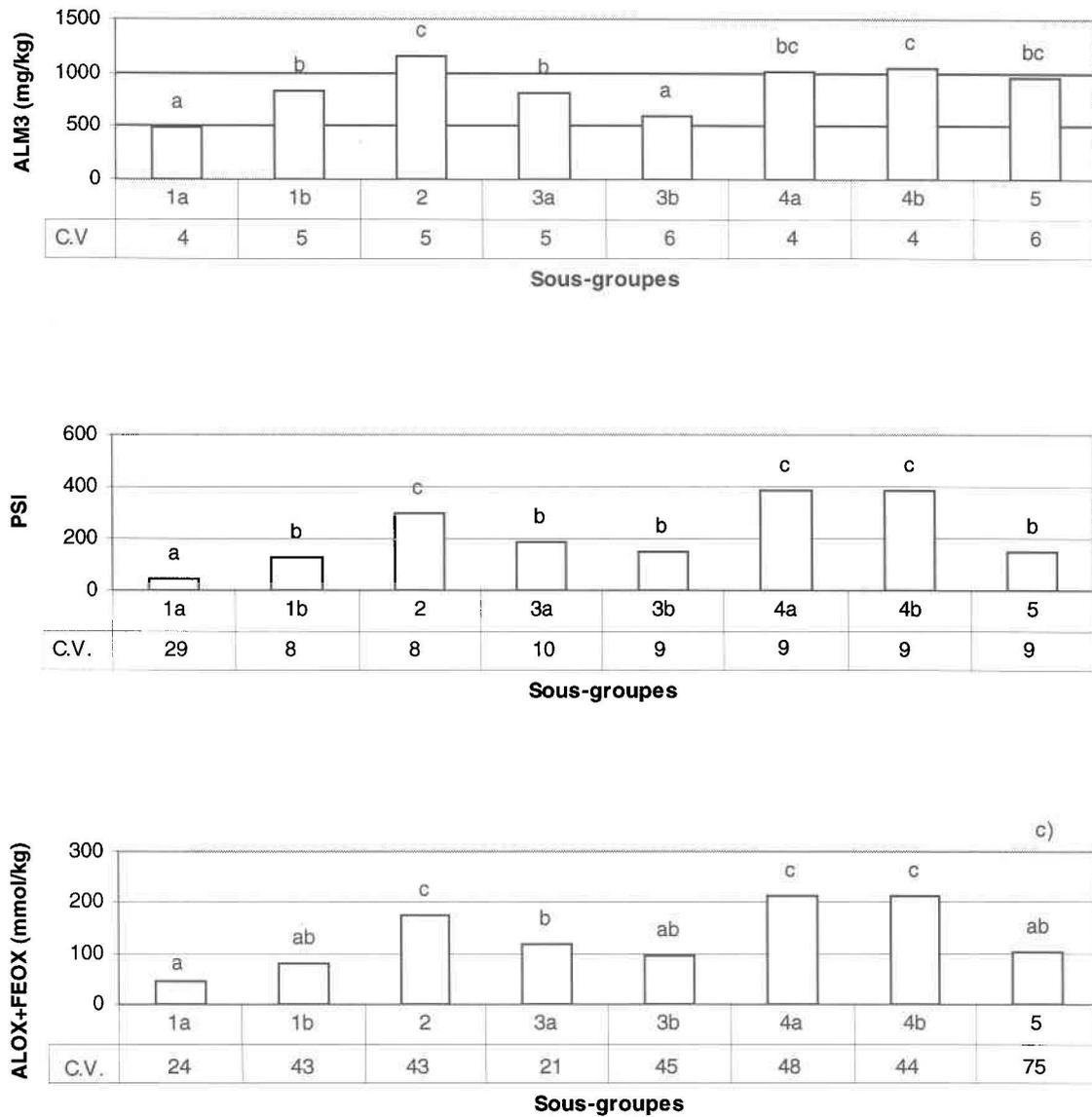


Figure 4.10: Valeurs moyennes du degré de saturation en P [POX/(ALOX+FEOX)] et [100.PM3/ALM3] pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique.



a-c les moyennes des sous-groupe ayant les mêmes lettres ne diffèrent pas significativement (0,05) tel que déterminé par la méthode de comparaison multiple de Tukey

Figure 4.11: Valeurs moyennes de la capacité de fixation en P déterminées pour chacun des sous-groupes par a) ALM3, b) PSI et c) (ALOX+FEOX)

Tableau 4.4 : Moyennes et coefficients de variation des 8 sous-groupes dérivés de l'analyse de groupement hiérarchique

Variables	Statistiques	Groupe 1		2	Groupe 3		Groupe 4		5								
		1a	1b		3a	3b	4a	4b									
ATOT	Moyenne (%)	8.1	ab	11.3	b	12.6	b	22.3	c	23.8	cd	29.2	d	42.6	e	5.5	a
	C.V.	31		43		48		23		42		35		33		35	
STOT	Moyenne (%)	71.8	de	65.9	cd	59.7	c	37.7	b	40.9	b	31.4	b	17.2	a	81.1	e
	C.V.	14		22		25		32		36		53		88		9	
LTOT <sup>†</sup>	Moyenne (%)	20.1	a	22.8	b	27.6	b	40.0	c	35.4	c	39.3	c	40.1	c	13.5	a
	C.V.	41		54		42		28		28		26		23		53	
CEC	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	9.3	ab	11.7	b	14.1	c	19.6	d	16.8	d	26.6	e	33.3	f	8.2	a
	C.V.	10		9		9		7		10		6		9		14	
PM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	42.2	bcd	45.2	cd	25.1	ab	26.5	abc	71.7	d	18.1	a	20.4	ab	32.7	abc
	C.V.	39		19		24		24		14		25		23		23	
CUM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	1.9	ab	2.2	bc	1.9	ab	3.1	cd	3.8	de	2.4	bc	4.9	e	1.3	a
	C.V.	21		30		32		23		22		25		25		34	
FEM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	260.1	ab	269.1	ab	284.0	ab	324.4	b	267.5	ab	310.7	ab	295.9	ab	244.7	a
	C.V.	7		6		6		5		6		5		6		6	
CAM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	1496.7	bc	1680.8	c	1037.9	b	2913.2	d	2966.1	d	3354.3	de	4939.4	e	401.0	a
	C.V.	5		6		10		4		6		6		6		12	
MNM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	14.0	abc	15.5	b	16.9	bc	27.2	cd	25.6	cd	20.7	bcd	28.2	d	7.6	a
	C.V.	21		20		29		17		16		23		20		28	
KM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	101.1	bc	91.8	b	84.1	b	130.5	bc	192.6	cd	263.0	de	363.3	e	35.5	a
	C.V.	17		17		16		14		12		15		15		26	
MGM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	127.2	bc	93.0	b	78.3	b	173.6	cd	238.4	d	117.2	bc	285.4	d	46.5	a
	C.V.	11		16		13		17		12		15		14		12	
NAM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	19.6	abc	18.2	ab	21.7	bc	35.2	de	27.9	cd	46.9	ef	63.1	f	12.8	a
	C.V.	22		15		18		16		11		17		13		12	

Tableau 4.4 : (suite)

Variables	Statistiques	Groupe 1		2	Groupe 3		Groupe 4		5
		1a	1b		3a	3b	4a	4b	
POX	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	192.7 bc	198.7 bc	177.5 b	256.5 cde	337.3 de	233.2 bcd	362.9 e	100.8 a
	C.V.	12	9	9	5	9	8	7	16
ALOX	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	735.1 a	1208.3 b	2426.0 c	1519.3 b	1389.9 b	2855.5 c	2942.5 c	1465.6 b
	C.V.	3	7	7	4	6	7	6	9
FEOX	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	833.8 a	1510.2 b	3480.7 c	3084.0 c	1837.2 b	4469.4 c	4505.3 c	1319.5 ab
	C.V.	6	7	6	5	6	6	5	11
PHEAU	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	6.8 e	6.2 cd	5.7 ab	6.5 de	6.8 e	5.9 bc	6.4 de	5.4 a
	C.V.	7	10	10	6	7	8	8	10
PHCA	Moyenne	6.2 ef	5.7 cd	5.1 ab	6.0 def	6.3 f	5.4 bc	5.9 de	4.7 a
	C.V.	8	11	11	7	7	9	9	11
CORG	Moyenne	1.7 a	2.1 ab	2.7 b	2.4 ab	2.2 ab	4.1 c	3.8 c	1.9 a
	C.V.	22	22	23	23	29	33	37	23
CA	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	5.8 bc	6.6 c	4.9 b	11.9 d	10.8 d	11.7 d	16.6 e	1.9 a
	C.V.	12	16	29	7	10	15	14	47
MG	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.9 b	0.9 b	0.8 b	1.9 c	2.4 c	2.7 c	5.3 d	0.3 a
	C.V.	45	38	63	25	24	31	16	78
K	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.3 bc	0.2 ab	0.2 ab	0.2 ab	0.4 c	0.2 ab	0.4 c	0.1 a
	C.V.	67	66	60	38	48	24	41	64
NA	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.1 a	0.1 a	0.1 ab	0.2 ab	0.2 ab	0.3 bc	0.3 c	0.1 a
	C.V.	65	70	132	59	121	81	54	79
PBR2	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	115.6 cd	92.0 c	50.5 a	74.3 bc	155.4 d	40.1 a	56.7 ab	57.7 ab
	C.V.	7	8	13	11	9	16	12	16

† pourcentage de particule de limon

a-f les moyennes des sous-groupes ayant les mêmes lettres ne diffèrent pas significativement (0,05) tel que déterminé par la méthode de comparaison multiple de Tukey

La variable FEM3 est la seule variable qui ne présente pas de moyennes nettement différentes entre les 8 sous-groupes au seuil de probabilité 0.001, ce qui s'explique par le fait que cette variable contribuait peu à l'explication des deux premières composantes utilisées par le groupement hiérarchique. Les autres variables ont des moyennes significativement différentes pour chacun des sous-groupes (Tableau 4.4). C'est-à-dire que la probabilité reliée au critère de signification de Fisher pour chacune des variables est inférieure à 0,05. On observe que certaines variables reliées à la fertilité des sols telles que ATOT, CORG et les cations échangeables, ont des coefficients de variation plus élevés ( $C.V=0.23$  à  $0.78$ ) que les autres à l'intérieur de chacun des groupes. Chacun des groupes et sous-groupes est décrit sommairement avec l'aide du tableau 4.4 et des figures 4.9, 4.10 et 4.11.

#### 4.1.4.3 Description des regroupements de sols

La combinaison des indices de saturation et de la mesure du P soluble est très valable pour expliquer la solubilité et la désorption du P du sol car ce sont des indicateurs environnementaux fiables pour déterminer les risques associés à l'état du P dans les sols [Sharpley, 1995; Giroux et Tran, 1996]. En ce qui a trait aux figures 4.9 et 4.10, les 8 sous-groupes peuvent aussi être séparés en trois catégories. On constate que pour chacun des sous-groupes l'indice de saturation  $[POX/(ALOX+FEOX)]$  est plus élevé que l'indice  $[100.PM3/ALM3]$ , excepté pour les sous-groupes 3b et 5 dont les valeurs moyennes pour ces deux indices sont pratiquement égales. Les sous-groupes 1a et 3b contiennent les sols qui ont des teneurs en PW ( $> 5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) et des indices de saturation ( $> 10\%$ ) les plus élevées. Ils regroupent donc les sols les plus vulnérables à la pollution de l'eau par le P si les autres facteurs de risque sont présents. Les teneurs en PW ( $0 - 2.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) et indices de saturation ( $< 7\%$ ) les plus faibles sont observés dans les sous-groupes 4a, 2, 5 et 4b. Les sous-groupes 3a et 1b englobent les sols avec une teneur modérée en PW ( $\sim 3 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Selon les trois indicateurs proposés, à la figure 4.11, pour évaluer l'indice de la capacité de fixation en P des sols, la mesure  $(ALOX+FEOX)$  démontre une tendance comparable à celle de l'indice de fixation PSI comparativement à l'indice ALM3 qui semble surestimer la

capacité de fixation des groupes 2 et 5. Ces deux groupes sont principalement composés de sols marqués par le processus de podzolisation à divers degrés. De plus, la mesure ALM3 semble la moins discriminante par rapport aux autres mesures de capacité de fixation. Trois catégories peuvent être également formées à partir de ces indices. Les sous-groupes 4a, 4b et 2 englobent les sols ayant un pouvoir fixateur plus élevé ( $PSI > 250$ ). Les sous-groupes 3a, 3b et 5 contiennent les sols possédant un indice de fixation modéré ( $125 - 250$ ). Les sols des sous-groupe 1a et 1b présentent les indices de fixation les plus faibles ( $< 125$ ).

Les 8 sous-groupes peuvent également être décrits sur la base d'autres indicateurs de fertilité. Le niveau de fertilité d'un sol croît à mesure que la C.E.C., le contenu en argile et la matière organique, le pH et la saturation en base ( $CA+MG+K/C.E.C.$ ) augmentent. Les sols du groupe 5 ont un niveau de fertilité ( $C.E.C.=8.2 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) et un pH (5.4) très faibles. Les sols du groupe 1 ont un niveau de fertilité similaire au groupe précédent. La distinction entre les sous-groupes 1a et 1b semble liée au contenu en PBR2 et au pH. Le sous-groupe 1a contient des sols avec une valeur de pH (6.8) et un contenu en PBR2 ( $115.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ) élevés. Le sous-groupe 1b compte les sols avec un pH (6.2) et un contenu en PBR2 plus faible que le sous-groupe 1a. Les sols du groupe 2 ont un niveau de fertilité modéré ( $C.E.C.=14.1 \text{ cmol kg}^{-1}$ ), un pH similaire au groupe 5 et des niveaux de PM3 et PBR2 comparables au groupe 5. Les sols appartenant au groupe 3 ont un niveau de fertilité modéré ( $C.E.C.=16.8$  et  $19.6 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) et un pH élevé. La différenciation entre les sous-groupes 3a et 3b est liée au contenu en phosphore assimilable, ce dernier est beaucoup plus riche en PBR2 ( $155.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ) et PM3 ( $71.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Le groupe 4 est caractérisé par des sols qui détiennent un niveau de fertilité élevée ( $C.E.C. > 25 \text{ cmol kg}^{-1}$ ). La séparation entre les sous-groupes 4a et 4b se situe principalement au niveau du pH. Le sous-groupe 4a englobe les sols ayant un pH plus faible (5.9) que les sols du sous-groupe 4b ( $PHEAU=6.4$ ).

#### 4.1.5 Analyse discriminante

Plusieurs analyses discriminantes ont été effectuées afin de différencier les 8 sous-groupes générés par la méthode de groupement hiérarchique à partir de plusieurs sous-ensembles de

variables. La première analyse a été pratiquée sur l'ensemble des variables, la suivante sur les éléments disponibles extraits au Mehlich III, les éléments extraits par l'oxalate d'ammonium et les indicateurs PSI et PW. Par la suite, l'analyse a été effectuée sur les éléments disponibles extraits par Mehlich III seulement. Pour terminer, seules les variables traditionnelles (STOT, ATOT, PBR2, NA, K, MG, CA, CEC, CORG) ont été utilisées. L'intérêt d'établir différents ensembles d'équations de classification est de classer de nouveaux échantillons de sols de la région provenant d'autres banques de données. Les modèles de classification établis pourront être reproduits selon les indicateurs de sols disponibles provenant des analyses de routine en fertilité ou des banques de données pédologiques obtenues lors des divers inventaires effectués dans la région.

#### **4.1.5.1 Analyse discriminante effectuée sur l'ensemble des variables**

Pour débiter, une analyse discriminante par étapes a été effectuée sur l'ensemble des variables. Cette façon de procéder consiste à sélectionner parmi les variables, celles qui participent significativement à la discrimination des groupes. Avec une valeur de Fisher (F) supérieure à 4, les variables ATOT, PSI, PW, CEC, CAM3, NAM3, ALM3, FEOX, PHCA et PBR2 ont été sélectionnées. Le pourcentage de bonnes classifications de cette sélection de variable était de 86 % pour la matrice ordinaire de classification et 81 % pour la matrice de Jackknife. Les résultats donnés par la matrice de classification ordinaire peuvent être trompeurs, parce que les fonctions de classification ont été évaluées avec les mêmes sols qui ont servi à les calculer. Par contre, la matrice Jackknife permet de remédier à ce problème en utilisant les fonctions élaborées avec tous les sols, excepté celui qui doit être classifié. Lorsque le pourcentage de bonnes classifications provenant de la matrice ordinaire est similaire à celui obtenu avec la matrice de Jackknife, le nombre de variables incluses dans le modèle est jugé acceptable. Dans ce cas-ci, il y a une grande différence entre les résultats des deux matrices de classification. Pour remédier à la situation, la valeur de F, pour sélectionner les variables discriminantes, a été haussée à 6,5. Ceci a eu une influence positive, puisque les variables ayant un niveau de tolérance plus faible ont été, pour la plupart, éliminées du modèle. Entre autre, les variables redondantes ou ayant une forte

corrélation avec une ou des variables déjà entrées dans le modèle contribuent à déstabiliser les fonctions de classification. Le modèle obtenu dans ces conditions est formé des variables ATOT, PSI, CEC, CAM3, NAM3, ALM3, PHCA et PBR2. Le pourcentage de classification a diminué légèrement, par contre les résultats obtenus de bonnes classifications à partir de la matrice ordinaire et de Jackknife sont respectivement de 83 % et 82 % (matrices non présentées). Une description sommaire des différentes étapes de l'analyse discriminante est montrée au tableau 4.5.

Tableau 4.5: Résumé des différentes étapes de l'analyse discriminante par étapes réalisée sur les 8 sous-groupes avec l'ensemble des variables

Étapes	Variables		Nombre de variables dans le modèle	Valeur de F à l'entrée ou sortie du modèle	Lambda de Wilks
	Entrée	Sortie			
1	CEC		1	118.57	0.2448
2	PW		2	34.94	0.1280
3	PHCA		3	31.49	0.0701
4	ATOT		4	16.51	0.0489
5	FEOX		5	9.96	0.0387
6	PSI		6	6.91	0.0327
7	NAM3		7	6.75	0.0277
8	CAM3		8	7.22	0.0232
9	PBR2		9	6.58	0.0197
10	ALM3		10	7.54	0.0164
11		PW	9	6.01	0.0191
12		FEOX	8	6.36	0.0223

Ainsi, les variables PW et FEOX entrées dans le modèle à la deuxième et à la cinquième étape avec une valeur de F supérieure à 6.5, ont été retirées, par la suite, puisque leurs valeurs de F ont diminué à l'intérieur du modèle suite à l'entrée de PBR2 et ALM3. Dans les tableaux 4.6 et 4.7, les caractéristiques générales et les fonctions de classification sont présentées.

Tableau 4.6: Caractéristiques des variables incluses dans le modèle de classification effectuées sur l'ensemble des variables

Variabes	Valeur de F à la fin de la sélection	Tolérance
ATOT	14.07	0.907
PSI	10.01	0.834
CEC	7.58	0.671
CAM3	7.53	0.523
NAM3	7.99	0.926
ALM3	10.10	0.762
PHCA	7.66	0.625
PBR2	28.58	0.833

Tableau 4.7: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 8 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante sur l'ensemble des variables

Variables	Sous-groupes							
	1a	1b	2	3a	3b	4a	4b	5
Constante	-442.74	-481.17	-489.05	-518.78	-502.79	-543.72	-584.41	-427.04
ATOT	0.20	0.21	0.19	0.33	0.43	0.37	0.60	0.13
Ln (PSI)	2.52	6.07	9.03	6.32	5.89	8.76	8.01	7.63
Ln (CEC)	-1.00	-3.49	-2.94	3.81	3.64	3.78	7.61	-7.51
Ln (CAM3)	30.96	33.59	32.70	33.78	32..50	36.19	35.56	29.62
Ln (NAM3)	18.13	18.27	18.98	20.77	19.09	22.31	23.06	16.49
Ln (ALM3+1)	72.05	77.60	80.59	77.36	72.48	80.13	80.08	77.95
PHCA	15.92	13.37	11.81	14.70	16.56	11.25	14.22	11.70
Ln (PBR2)	10.01	7.46	3.49	7.17	11.67	3.70	6.25	4.18

Les fonctions de classification calculées pour chacun des groupes servent à attribuer chaque sol à un groupe. Un sol appartient à un groupe lorsque la valeur obtenue de la fonction de classification de ce groupe est la plus élevée par rapport à celles des autres groupes (Tableau 4.7). Les valeurs de F présentées au tableau 4.6 permettent d'affirmer que les variables PBR2 et ATOT ont un pouvoir de discrimination important dans la différenciation des sous-groupes. De plus, elles ont les valeurs de tolérance les plus élevées. Les variables PHCA et CAM3 ont les valeurs de tolérance les plus faibles du modèle. L'efficacité des

fonctions de classification extraites est bonne, puisque 83 % des sols ont été correctement classifiés.

Les sous-groupes 1a et 5 ont des niveaux élevés de bonnes classifications. Le sous-groupe 4b obtient le plus faible pourcentage de bonnes classifications, soit 70%. La plupart des sols mal classifiés du sous-groupe 4b se sont retrouvés dans le sous-groupe 4a. Les distances de Mahalanobis, mesurées entre chaque sol et le centroïde de chacun des 8 sous-groupes, permettent d'observer que les sols mal classés du sous-groupe 4b ont des distances très rapprochées de celles du sous-groupe 4a (données non présentées). La distinction entre les sous-groupes 4a et 4b semble plus difficile à obtenir avec ce modèle.

Deux fonctions canoniques discriminantes ont été conservées, étant donné que les valeurs propres reliées à ces deux fonctions sont élevées par rapport aux fonctions extraites par la suite. De plus, la corrélation canonique, qui sert à mesurer le degré d'association entre les groupes et chacune des fonctions discriminantes, indique la grande utilité de chacune des deux fonctions discriminantes. La première fonction possède 65 % du pouvoir discriminant total et la deuxième 28 %, pour un total de 95 % de la dispersion pour les 2 premières fonctions. Ainsi, la première fonction est surtout expliquée, relativement dans la même proportion, par le pourcentage d'argile et la capacité d'échange cationique (fertilité intrinsèque). La deuxième fonction est surtout expliquée par le contenu en P extrait par Bray II et le pH au  $\text{CaCl}_2$ , variables représentant la disponibilité en P et, dans une moindre mesure, par PSI et ALM3 (capacité de fixation). La première fonction ne permet pas de bien discriminer les sols argileux (4a et 4b), puisqu'ils ont sensiblement le même degré de fertilité. De plus, la moyenne de PBR2, la variable importante dans la deuxième fonction, pour chacun des deux sous-groupes est similaire (données non présentées).

#### **4.1.5.2 Analyse discriminante effectuées sur les variables modernes**

Une analyse discriminante par étapes a été effectuée, par la suite, sur les variables extraites par Mehlich III, l'oxalate d'ammonium et sur 2 indicateurs reliés à la fixation et à la

désorption du P, PW et PSI. Après amélioration, le modèle final était formé des variables ATOT, PSI, PW, CAM3, NAM3, FEOX et PHCA. Les résultats obtenus de bonnes classifications de la matrice ordinaire et de la matrice de Jackknife (Tableau D.2) étaient respectivement de 79 % et 76 %. Le pourcentage de bonnes classifications a donc diminué un peu par rapport au modèle généré à partir de l'ensemble des variables. Le groupe 2 obtient le plus faible pourcentage de bonnes classifications, soit 71 % (Tableau D.2). La plupart des sols mal classifiés de ce groupe se sont retrouvés dans les sous-groupes 3a, 1b et 5. La différenciation entre ces trois groupes est difficile puisqu'ils ont sensiblement le même pourcentage d'argile et ils englobent des sols enrichis en sesquioxydes de fer et d'aluminium à différents degrés. Les types de sols reclassifiés (Annexe D) dans d'autres sous-groupes que celui défini par le groupement hiérarchique sont pour la plupart de classe de texture 2 et 3 (Tableau D.4).

Les variables PW, CAM3 et ATOT ont un pouvoir de discrimination important dans la différenciation des sous-groupes. Au tableau 4.8 sont présentées les équations de classification pour chacun des sous-groupes. Les deux principales fonctions canoniques ont été conservées pour connaître l'ordre d'importance des variables dans le modèle. La première fonction est principalement expliquée par CAM3 et par le pourcentage d'argile (fertilité intrinsèque). La deuxième fonction est principalement expliquée par PW et le pH au  $\text{CaCl}_2$  (l'intensité de la désorption du P). La variable PW dans la deuxième fonction ne permet pas de séparer les groupes selon leur capacité de fixation, mais selon leur tendance à la désorption en P, une mesure qui est davantage variable à l'intérieur de chacun des sous-groupes (C.V.=23 % à 54 %). Les variables PSI et FEOX ne semblent pas avoir une grande importance dans la distinction des groupes, ce qui peut expliquer la difficulté de bien classer les sols du sous-groupes 2 (données non présentées).

Tableau 4.8: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 8 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante sur les variables M3, OX, PW et PSI.

Variables	Sous-groupes							
	1a	1b	2	3a	3b	4a	4b	5
Constante	-301.16	-311.49	-324.20	-365.43	-361.49	-382.92	-409.32	-253.54
ATOT	-0.40	-0.38	-0.39	-0.26	-0.19	-0.19	0.03	-0.42
Ln (PSI)	8.57	11.64	13.80	12.36	12.60	14.43	14.84	12.26
Ln (PW+1)	20.10	17.12	14.63	17.64	21.30	15.57	17.23	13.85
Ln (CAM3+1)	25.36	27.00	26.41	29.25	28.03	31.59	31.62	22.06
Ln (NAM3+1)	14.34	14.25	14.97	16.99	15.45	18.35	19.04	12.38
Ln (FEOX)	30.89	32.02	34.34	34.61	32.69	35.13	34.71	30.53
PHCA	14.50	11.53	9.42	11.82	14.48	8.04	10.62	10.06

#### 4.1.5.3 Analyse discriminante effectuée sur les variables M3 seulement

Ensuite, l'analyse discriminante par étapes a été effectuée sur les variables extraites par Mehlich III seulement. Les variables sélectionnées dans le modèle final étaient PM3, CAM3, KM3, MGM3, NAM3, ALM3, PHEAU et STOT. Seulement les fonctions de classification du modèle sont présentées au tableau 4.9, les autres résultats de l'analyse ne sont qu'énumérés ci-dessous. Le pourcentage de classification a diminué légèrement, par contre les résultats de bonnes classifications de la matrice ordinaire et de Jackknife sont respectivement de 75 % et 71 %. Le sous-groupe 1b obtient le plus faible pourcentage de bonnes classifications, soit 59 %. Les sous-groupes 3a et 2 obtiennent aussi un pourcentage de bonnes classifications faible. La plupart des sols mal classifiés du sous-groupe 1b se sont retrouvés dans les sous-groupes 1a, 2 et 3a. La distinction entre le groupe 1b et les sous-groupes 1a, 2 et 3a, semble plus difficile à obtenir avec les variables incluses dans ce modèle. Les variables MGM3 et ALM3 ont un pouvoir de discrimination important dans la différenciation des sous-groupes.

Les deux principales fonctions canoniques ont été conservées pour connaître l'ordre d'importance des variables dans le modèle. La première fonction canonique est surtout expliquée par CAM3 et plus faiblement par MGM3 (fertilité intrinsèque), dans une moindre

mesure, à l'opposé STOT. La deuxième fonction est surtout expliquée par ALM3, exprimant la fixation de P et, à l'opposé, le pH à l'eau et PM3, lié à la disponibilité du P. La variable ATOT semble davantage efficace dans la distinction des groupes par rapport aux éléments disponibles reliés à celle-ci (CAM3 et MGM3) et inclus dans le modèle. On constate que les sous-groupes englobant des sols contenant des sesquioxydes de fer et d'aluminium (1b, 2, 3a) de texture plus loameuse, n'obtiennent pas une bonne classification probablement à cause du peu de variation entre les moyennes des variables PHEAU et ALM3 de ces sous-groupes. Les sous-groupes 5, 4a et 4b avec une forte proportion de sable ou d'argile, obtiennent une bonne classification des sols. Les sous-groupes plus enclins à la désorption du P, 1a et 3b caractérisés par des pH et des contenus en PM3 élevés ont aussi une bonne classification de leur sols (données non présentées).

Tableau 4.9: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 8 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante sur les variables M3 seulement

Variables	Sous-groupes							
	1a	1b	2	3a	3b	4a	4b	5
Constante	-523.52	-547.53	-549.56	-584.22	-567.47	-602.08	-648.74	-487.63
STOT	0.63	0.57	0.54	0.46	0.47	0.44	0.39	0.61
Ln (PM3+1)	-5.12	-5.64	-7.17	-6.18	-3.94	-7.13	-6.89	-6.63
Ln (CAM3)	29.06	32.05	31.61	34.21	32.29	36.27	36.70	27.44
Ln (KM3+1)	10.38	8.68	8.03	8.87	10.64	9.01	10.26	7.28
Ln (MGM3)	18.82	17.41	16.63	18.72	19.94	17.92	20.37	15.02
Ln (NAM3)	17.84	18.38	19.23	20.47	18.85	22.19	22.65	17.07
Ln (ALM3+1)	75.95	82.34	86.40	84.38	79.00	87.45	88.63	82.08
PHEAU	20.94	17.78	15.87	17.81	20.06	14.73	16.94	16.58

#### 4.1.5.4 Analyse discriminante effectuée sur les variables traditionnelles

Pour terminer, l'analyse discriminante par étapes a été effectuée sur les variables traditionnelles seulement. Le modèle final était formé à partir des variables CEC, PHCA, MG, PBR2 et ATOT. Le pourcentage de classification a diminué légèrement; les résultats obtenus de bonnes classifications de la matrice ordinaire et de Jackknife (Tableau D.3)

étaient respectivement de 74 % et 71 %. Le sous-groupe 1b obtient encore le plus faible pourcentage de bonnes classifications, soit 49 % (Tableau D.3). Les sous-groupes 1a et 2 obtiennent aussi un pourcentage de bonnes classifications faible. La plupart des sols mal classifiés du sous-groupe 1b se sont retrouvés dans le sous-groupe 1a. La distinction entre le sous-groupe 1b et les sous-groupes 1a et 2, semble plus difficile à obtenir avec les variables incluses dans ce modèle (Tableau D.4). Ces groupes ont sensiblement les mêmes textures 2 et 3 (Tableau D.1). Les variables PHCA, PBR2 et MG, ont un pouvoir de discrimination important dans la différenciation des sous-groupes. Les fonctions de classification sont présentées au tableau 4.10.

Tableau 4.10: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 8 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante sur les variables traditionnelles

Variables	Sous-groupes							
	1a	1b	2	3a	3b	4a	4b	5
Constante	-186.17	-178.34	-159.53	-209.39	-230.39	-198.38	-242.22	-131.65
Ln (CEC)	37.67	41.16	44.18	48.02	44.94	51.78	53.32	36.48
PHCA	26.78	25.07	22.64	26.60	28.18	24.21	26.88	21.00
Ln (PBR2)	24.26	23.16	20.31	23.10	26.56	20.52	23.16	20.23
ATOT	0.35	0.38	0.36	0.49	0.54	0.53	0.71	0.30
Ln (MG+1)	0.84	-0.73	-2.62	1.02	3.65	1.46	5.83	-4.26

Les deux principales fonctions canoniques ont été conservées pour l'interprétation des sous-groupes. La première fonction canonique est surtout expliquée par la capacité d'échange cationique et, dans une moindre mesure, par le pourcentage d'argile et le pH au  $\text{CaCl}_2$  (fertilité intrinsèque). La deuxième fonction est surtout expliquée par le contenu en PBR2 et, de plus, le pH au  $\text{CaCl}_2$  est mieux représenté; ces deux variables étant reliées à la disponibilité en P. Les sous-groupes 1a, 1b et 2 ont sensiblement le même niveau de fertilité et il n'y pas de variables reliées directement à la fixation du P dans le modèle (sesquioxides de fer et d'aluminium ou matière organique) qui apporteraient un élément de plus pour bien différencier le sous-groupe 1b de 1a et 2 (données non présentées).

#### 4.1.6 Résumé

À partir de l'analyse en composantes principales, les deux premières composantes principales ont été retenues pour fins d'interprétation et pour effectuer le classement des types de sols en groupes de fertilité par l'utilisation de la méthode Ward de groupement hiérarchique. La première est expliquée par les variables liées à la texture et au degré de fertilité du sol. Les descripteurs expliquant la seconde composante permettent de séparer les types de sols fixateurs des types de sols moins fixateurs et plus enclins à la désorption. L'interprétation des 8 sous-groupes obtenus a été effectuée grâce à l'analyse de variance et l'ordination en espace réduit. Les types de sols appartenant au sous-groupe 1a sont les plus enclins à la désorption en P. Ils ont en majorité un substratum calcaire amenant un pH neutre (PHEAU=6.8) dans la couche de surface. Leur capacité de fixation ( $< 125$ ) est associée aux indices de saturation en P plus élevés. Le sous-groupe 1b est similaire au précédent mis à part l'incorporation de types de sols avec un horizon B enrichi en sesquioxydes de fer et d'aluminium améliorant son pouvoir de fixation du P et un substratum majoritairement non calcaire. Le sous-groupe 3b contient des sols avec un substratum calcaire, un indice de saturation en P et un contenu en PW élevés, comparables au sous-groupe 1a, même si leur capacité de fixation en P (PSI=125 -250) et le contenu en ATOT sont plus élevés. Les sols du sous-groupe 3a ont une capacité de fixation modérée (PSI=125 - 250) similaire au sous-groupe précédent; malgré qu'elle soit plus forte que celle du sous-groupe 1b, leurs indices de saturation en P et niveau de PW sont similaires. Les groupes 2 et 5 regroupent des types de sols podzoliques ou ayant un horizon B enrichi à divers degrés en sesquioxydes de fer et d'aluminium. Le groupe 5 contient des sols moins fixateurs que le groupe 2 et son niveau de fertilité est plus faible (texture de surface plus sableuse). Les sols du sous-groupe 4a et 4b sont les plus fixateurs de P, comparable à celle du groupe 2 et leur niveau de fertilité est élevé aussi. Le sous-groupe 4b possède un pH et un contenu en argile plus élevés. Ces deux sous-groupes semblent être les moins sensibles à la désorption en P.

---

Les variables retenues par l'analyse discriminante comme étant les plus efficaces pour discriminer les différents sous-groupes sont PBR2, PHCA et ATOT, parmi les indicateurs traditionnels et ALM3 pour les indicateurs modernes. Le modèle établi à partir des indicateurs modernes est plus efficace dans la distinction des groupes que celui avec les indicateurs traditionnels. Le modèle avec les indicateurs traditionnels ne contient pas de variables directement reliées à la capacité de fixation en P telles que le contenu en sesquioxydes de fer et d'aluminium et le taux de matière organique, mais plutôt des variables reliées à la disponibilité et à la désorption du P, plus variables à l'intérieur d'un même groupe.

## 4.2 Groupement effectué sur les séries de sols à partir des descripteurs du sous-sol

### 4.2.1 Relations entre les variables étudiées

L'examen des coefficients de corrélation des variables du sous-sol, exposés dans le tableau 4.11, a permis de connaître davantage les relations entre les variables, notamment celles touchant la capacité de fixation et le degré de saturation en P. La variable PSI, représentant la capacité de fixation en P est significativement ( $P < 0.001$ ) reliée (positivement) avec ALOX, ALM3, FEOX, CORG, CEC, POX et K ( $r > 0.4$ ) et plus faiblement avec ATOT ( $r=0.37$ ). Ceci confirme la contribution significative des sesquioxydes de fer et d'aluminium, de la matière organique et de l'argile dans la capacité de fixation du P dans les sols de la plaine de Montréal comme l'avaient démontré les travaux antérieurs [Giroux et Tran, 1985; Simard et Lapierre, 1990; Simard et *al.*, 1994]. Bien que ALM3 soit un bon indicateur de la capacité de fixation, il demeure que le coefficient de corrélation est plus élevé avec ALOX qu'avec ALM3. Les sesquioxydes de fer (FEOX) apporte également une contribution significative à la capacité de fixation du P des sols comme l'avaient souligné Simard et *al.* (1994) et Beauchemin (1996). Ces relations démontrent également l'importance de la genèse et plus particulièrement du niveau de podzolisation dans la capacité de fixation du P particulièrement au niveau du sous-sol, siège de l'activité génétique au niveau du profil. La relation ALOX, FEOX et PSI demeure valable pour les sols neutres à calcaires (spécifique à notre région étudiée), majoritairement gleysoliques (Tran et Giroux, 1987; Beauchemin et Simard, 1999).

Tableau 4.11: Coefficients de corrélation de Pearson de l'horizon B entre les propriétés du sol et indicateurs relatifs au

Variables	PSI	PW	PM3	AIM3	POX	ALOX	FEOX	PBR2	PSATM3	PSATOX
PSI	1.00	-0.06	0.14	0.69 ***	0.44 ***	0.81 ***	0.62 ***	-0.13	-0.10	-0.34 **
PW	-0.06	1.00	0.11	-0.20	0.22	-0.08	-0.03	0.32	0.25	0.24
PM3	0.14	0.11	1.00	0.35 *	0.04	0.30	-0.08	0.12	0.77 ***	-0.20
CUM3	0.09	0.21	-0.39 **	-0.18	0.52 ***	-0.08	0.07	0.35 *	-0.22	0.51 ***
MNM3	0.02	0.02	-0.45 ***	-0.19	0.38 **	-0.19	0.30	0.06	-0.23	0.24
FEM3	-0.04	0.16	0.11	0.12	0.16	-0.10	0.24	0.15	0.09	0.15
CAM3	0.14	0.23	-0.61 ***	-0.23	0.40 ***	-0.08	0.22	0.11	-0.38 ***	0.31 *
KM3	0.27	0.05	-0.50 ***	0.02	0.45 ***	0.07	0.33 *	0.05	-0.36 ***	0.21
MGM3	0.16	0.52 ***	-0.25	-0.16	0.40 ***	-0.01	0.18	0.18	-0.14	0.26
NAM3	0.39 **	0.32	-0.32	0.09	0.52 ***	0.20	0.36 *	0.10	-0.24	0.22
ALM3	0.69 ***	-0.20	0.35 *	1.00	0.34 *	0.82 ***	0.51 ***	-0.14	-0.07	-0.38 ***
POX	0.44 ***	0.22	0.04	0.34 *	1.00	0.40 ***	0.44 ***	0.43 ***	0.03	0.43 ***
ALOX	0.81 ***	-0.08	0.30	0.82 ***	0.40 ***	1.00	0.62 ***	-0.19	-0.03	-0.48 ***
FEOX	0.62 ***	-0.03	-0.08	0.51 ***	0.44 ***	0.62 ***	1.00	-0.23	-0.24	-0.38 ***
PHEAU	-0.13	0.23	-0.45 ***	-0.42 ***	0.21	-0.23	-0.05	0.21	-0.17	0.37 ***
PHCA	-0.14	0.18	-0.45 ***	-0.44 ***	0.18	-0.25	-0.09	0.20	-0.16	0.38 ***
CORG	0.58 ***	-0.14	0.30	0.59 ***	0.16	0.72 ***	0.38 **	-0.17	0.15	-0.32 *
CA	0.20	0.17	-0.56 ***	-0.16	0.49 ***	0.02	0.27	0.10	-0.33 **	0.29
MG	0.24	0.25	-0.48 ***	-0.07	0.53 ***	0.05	0.34 *	0.12	-0.27	0.26
K	0.42 ***	0.21	-0.15	0.19	0.49 ***	0.30	0.35 *	0.05	-0.17	0.09
NA	0.24	0.24	-0.16	0.05	0.29	0.14	0.26	0.13	-0.01	0.07
CEC	0.52 ***	0.17	-0.37 **	0.28	0.57 ***	0.42 ***	0.53 ***	0.01	-0.32 *	0.06
PBR2	-0.13	0.32	0.12	-0.14	0.43 ***	-0.19	-0.23	1.00	0.25	0.55 ***
ATOT	0.37 **	0.30	-0.39 **	0.08	0.63 ***	0.19	0.38 **	0.16	-0.27	0.28
STOT	-0.36 *	-0.24	0.44 ***	-0.02	-0.62 ***	-0.14	-0.43 ***	-0.18	0.30 *	-0.27

\*, \*\*, \*\*\* niveaux de signification dans l'ordre P=0.05, P=0.01 et P=0.001, respectivement (n=119)

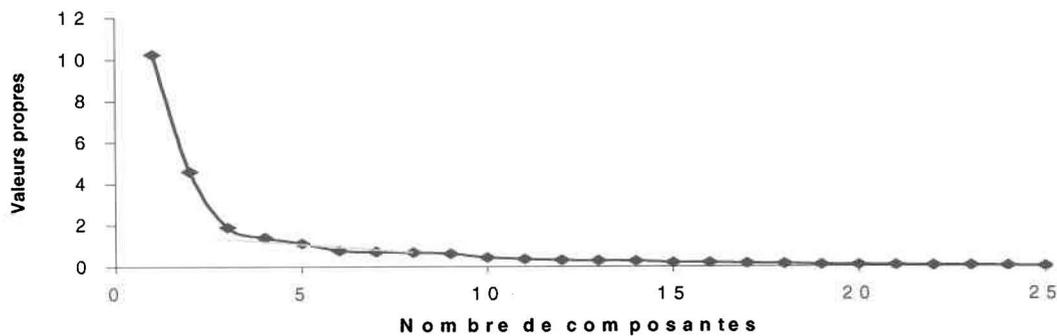
La variable PW, exprimant le contenu en P soluble et servant d'indice de désorption est peu relié aux autres descripteurs du sous-sol à l'exception de MGM3 avec lequel elle présente une relation positive ( $r=0.52$ ). La variable PM3 est bien reliée avec la variable STOT, et négativement corrélée avec CAM3, KM3, PHEAU, PHCA et MNM3. La texture et le pH ont une influence sur le contenu en P assimilable du sous-sol. La variable PM3 est plus élevée dans les sols sableux que dans les sols argileux. La variable ALM3 est négativement liée au pH du sol. Elle est aussi liée positivement aux indicateurs de la fixation comme PSI, FEOX et ALOX. La variable ALOX est liée positivement à la matière organique et à la C.E.C. La variable FEOX est davantage liée aux variables ATOT et CEC que ALOX. La variable PSATM3 est significativement liée de façon négative, faible mais significative, aux variables CAM3 et KM3. La variable PSATOX est reliée positivement aux variables CUM3, POX, PHEAU et PHCA. Elle a de plus une relation négative, faible mais significative, avec la variable PSI. Au niveau du sous-sol, l'indice de saturation PSATOX est donc plus intéressant pour expliquer le phénomène de sorption du P que l'indice PSATM3.

#### **4.2.2 Analyse en composantes principales**

Une analyse en composantes principales a été effectuée sur la matrice de corrélation des vingt-cinq variables. Dans le tableau 4.12, les différentes valeurs propres et le pourcentage de la variance expliquée sont retrouvés pour chacune des composantes extraites. Les valeurs propres des premières composantes sont élevées et représentent à elles seules une grande part de la variabilité contenue dans la matrice de données. Selon la règle du test du talus (*scree test*), trois composantes suffisent pour résumer l'information provenant de la matrice de données (Figure 4.12). Le pourcentage de variance totale expliquée par les trois premières composantes est de 67,02 %.

Tableau 4.12: Les différentes valeurs propres des composantes et le pourcentage de la variance expliquée et cumulative

Composantes	Valeurs propres	Variance (%)	
		expliquée	cumulée
1	10.26	41.04	41.04
2	4.58	18.34	59.38
3	1.91	7.64	67.02
4	1.41	5.64	72.66
5	1.13	4.51	77.17
6	0.78	3.13	80.3
7	0.73	2.93	83.23
8	0.68	2.74	85.97
9	0.63	2.50	88.47
10	0.44	1.75	90.22
11	0.37	1.48	91.7
12	0.32	1.30	93.00
13	0.30	1.19	94.19
14	0.27	1.09	95.28
15	0.21	0.85	96.13
16	0.21	0.84	96.97
17	0.16	0.65	97.62
18	0.15	0.59	98.21
19	0.11	0.44	98.65
20	0.09	0.34	98.99
21	0.08	0.32	99.31
22	0.06	0.26	99.57
23	0.05	0.20	99.77
24	0.04	0.16	99.93
25	0.02	0.07	100.00

Figure 4.12: Solution graphique du test du talus (*scree test*) pour déterminer le nombre de composantes interprétables

À partir de la matrice des saturations présentée au tableau 4.13, les variables STOT, MG, ATOT, CA, CAM3 et CEC expliquent bien la première composante principale et sont liées à la texture, à la fertilité naturelle et à la réaction du sol. D'autres variables comme PHEAU

et PHCA, explique une partie de la composante principale bien qu'elles caractérisent aussi la deuxième composante. La deuxième composante semble bien caractérisée par les variables reliées à la capacité de fixation en P des sols telles que ALOX, ALM3, PSI, CORG et FEOX. La troisième composante est expliquée par les variables PBR2, PW et PM3, exprimant la disponibilité du phosphore et l'intensité de la désorption du P des sols. La variable FEM3 semble faiblement présente seulement dans la troisième composante. La première et la deuxième devraient donc jouer un rôle important dans la formation des groupes de sols pour la gestion du P. Les deux premières composantes expriment le comportement intrinsèque comme la fertilité et la capacité de fixation, tandis que la troisième fait plutôt ressortir l'effet de l'aménagement et l'intensité de la fertilisation des sols. Ces deux composantes représentent, à elles seules, 60 % de la variance totale. Ainsi, les deux premières composantes ont été conservées pour des fins d'interprétation pour effectuer le classement des séries de sols en groupe de fertilité.

Tableau 4.13: Matrice des saturations des composantes conservées.

Variables	Composantes		
	1	2	3
1 ATOT	0.91	0.13	-0.12
2 STOT	-0.94	-0.07	0.02
3 PSI	0.33	0.81	0.11
4 PW	0.30	-0.14	-0.66
5 CEC	0.82	0.36	0.10
6 PM3	-0.50	0.40	-0.53
7 CUM3	0.76	-0.17	-0.16
8 FEM3	0.08	0.13	-0.43
9 CAM3	0.85	-0.23	0.19
10 MNM3	0.64	-0.21	0.18
11 KM3	0.79	0.01	0.24
12 MGM3	0.74	-0.09	-0.30
13 NAM3	0.79	0.16	-0.11
14 ALM3	-0.03	0.89	0.02
15 POX	0.63	0.37	-0.33
16 ALOX	0.12	0.91	0.09
17 FEOX	0.40	0.65	0.19
18 PHEAU	0.61	-0.51	0.11
19 PHCA	0.59	-0.52	0.14
20 CORG	-0.11	0.76	0.06
21 CA	0.91	-0.15	0.17
22 MG	0.93	-0.03	0.02
23 K	0.70	0.23	-0.06
24 NA	0.61	0.08	-0.15
25 PBR2	0.18	-0.21	-0.68

La figure 4.13 montre une projection graphique des saturations des composantes dans un espace délimité par les deux premières composantes. La position des descripteurs, dans l'espace réduit, permet de déterminer la contribution négative ou positive des variables le long de l'axe-composante. Les variables expliquant la première composante sont liées à la texture et au degré de fertilité du sol, les sols sableux occupent la partie négative de l'axe, les sols loameux la partie centrale (près de zéro) et les sols argileux la partie positive. Les descripteurs expliquant la seconde composante permettent d'identifier sur la partie positive de l'axe les sols fixateurs de P.

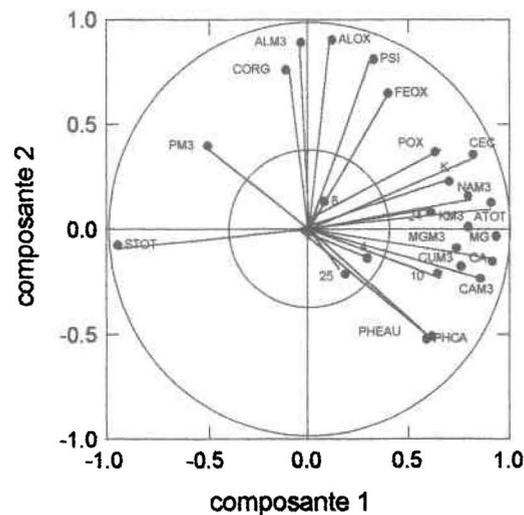


Figure 4.13: Représentation des variables dans le plan défini par les deux premières composantes.(Consulter le tableau 4.13 pour connaître le symbole numérique des variables)

### 4.2.3 Groupement hiérarchique

Les résultats de la méthode de groupement sont présentés dans la figure 4.14 par un dendogramme simplifié. Le détail des différentes séries de sols, présentes dans chacun des sous-groupes, est exposé dans l'Annexe E. La figure 4.15 représente graphiquement la distance euclidienne des différents niveaux de fusion des groupements, tout le long de la structure hiérarchique du dendogramme.

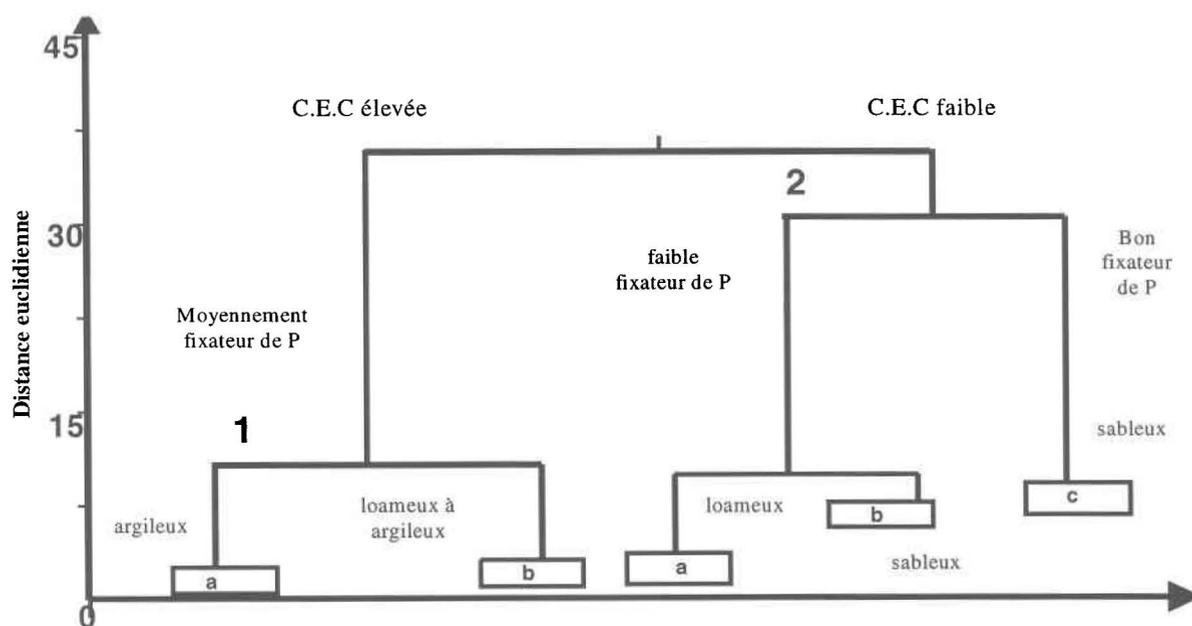


Figure 4.14: Dendogramme simplifié obtenu selon la méthode de Ward à partir des pointages des deux premières composantes

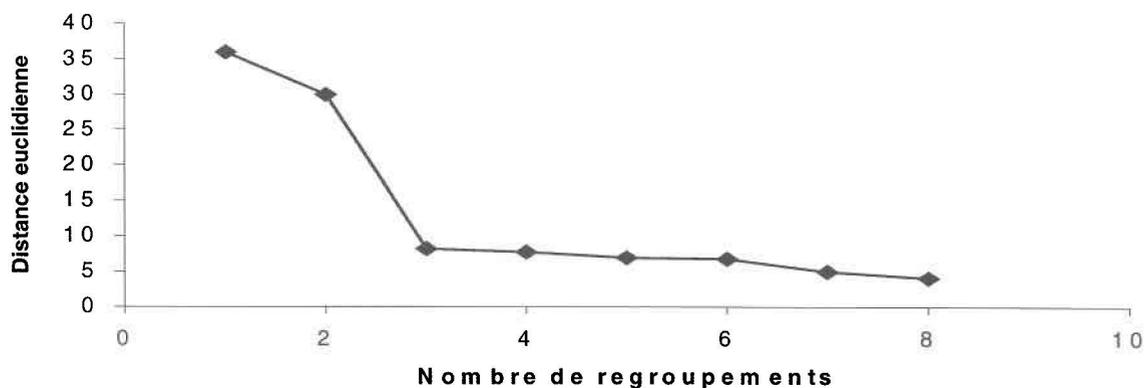


Figure 4.15: Solution graphique pour déterminer le nombre optimum de groupes

Au moyen de la solution graphique de la figure 4.15, 2 groupes de séries de sols sont retenus pour analyse. Le dendogramme démontre au niveau de généralisation le plus élevé (distance euclidienne  $>35$ ), deux ensembles de sols distincts représentant la capacité d'échange cationique, sous la branche de droite, les faibles C.E.C. (groupe 2) et sous la branche gauche, les C.E.C. plus élevées (groupe 1). La capacité de fixation du P constitue le second niveau de groupement: les sols fixateurs à l'extrême droite (groupe 2), moyennement fixateurs à gauche (groupe 1) et peu fixateurs au centre de la figure (groupe 2). Enfin, le troisième niveau permet de distinguer les 5 sous-groupes de séries de sols selon la texture.

Les groupes de séries de sols (Annexe E) formés ont des caractéristiques particulières telles que la texture de l'horizon B et la nature des horizons inférieurs reliées à la série de sol. Ainsi, le groupe 1 peut être subdivisé en deux sous-groupes. Les sols appartenant au sous-groupe 1a ont une texture argileuse. La moitié des séries de ce sous-groupe ont un substratum calcaire. La couche de surface de ces séries appartiennent aux classes texturales 4 et 5 (section 3.2.2). Les sols du groupe 1b ont des textures loameuse à argileuses. Un peu moins de la moitié des séries de sols ont un substratum calcaire. Ces sols sont caractérisés par les classes texturales de surface 3 et 4. Le groupe 2 peut être également subdivisé en

trois sous-groupes. Les séries de sols appartenant au sous-groupe 2a ont une texture loameuse et, pour certains sols, loameux-grossier. Les deux tiers des sols ont un substratum non calcaire. La couche de surface de ces séries appartiennent aux classes texturales 2 et 3. Le sous-groupe 2b possède des séries de sols ayant une texture sableuse et un substratum non calcaire. La couche de surface des sols est caractérisée par les classes texturales 1 et 2. Le sous-groupe 2c est qualifié par des séries à texture sableuse et loameux-grossier. Plusieurs sols appartiennent à l'ordre des podzols et brunisols. La couche de surface de ces séries appartiennent aux classes texturales 1 et 2.

Pour interpréter la partition du dendogramme et mettre en évidence les relations entre les groupes de séries de sols et les descripteurs de sols, une superposition du dendogramme et de l'ordination dans l'espace réduit défini par les trois premières composantes a été réalisée. De plus, une analyse de variance, effectuée sur les descripteurs de sols; celle-ci a permis de cerner et de décrire les indicateurs de sols qui présentent des différences significatives entre chacun des groupes.

#### **4.2.4 Interprétation des groupements**

##### **4.2.4.1 Ordination des pointages dans l'espace réduit défini par les composantes principales sélectionnées.**

Selon les figures 4.16, 4.17 et 4.18, les différentes propriétés de sol sélectionnées à la section 3.2.2 sont utilisées pour interpréter les regroupements de l'ordination dans l'espace réduit défini par les premières composantes principales.

La figure 4.16 a) permet de constater que les sols du sous-groupe 2c, situés dans la partie supérieure du second axe, sont plus fortement fixateurs du P. La figure 4.16 b) représente les diverses classes texturales des sols. La composante 1 permet de distinguer les textures des différents groupes. Les sous-groupes 2c et 2b possèdent les textures ayant le plus fort contenu en sable, viennent par la suite les sous-groupes 2a et 1b qui ont des textures plus

---

loameuses. Le groupe 1a englobe les sols ayant une texture plus argileuse. La figure 4.16 c) donne une présentation du contenu en carbonates des sols. Les sous-groupes 2a, 1a et 1b contiennent une forte proportion de sols avec du carbonate au niveau du substratum. La figure 4.17 a) représente la répartition des différents horizons de sols. Les horizons Bf reliés aux podzols se retrouvent presque exclusivement dans le groupe 2c. Les sous-groupes 2a, 1a et 1b sont caractérisés par un horizons Bg typique des gleysols. On note que certaines séries ont un sous-sol enrichi en sesquioxydes (Bfj et Bgf) mais appartiennent à l'ordre des gleysols et sont principalement répertoriées dans le groupe 2b et 2a. La figure 4.17 b) permet de distinguer le groupe 2c des autres, puisqu'il est représenté en forte majorité par des sols des grands groupes: podzols humiques et humo-ferriques.

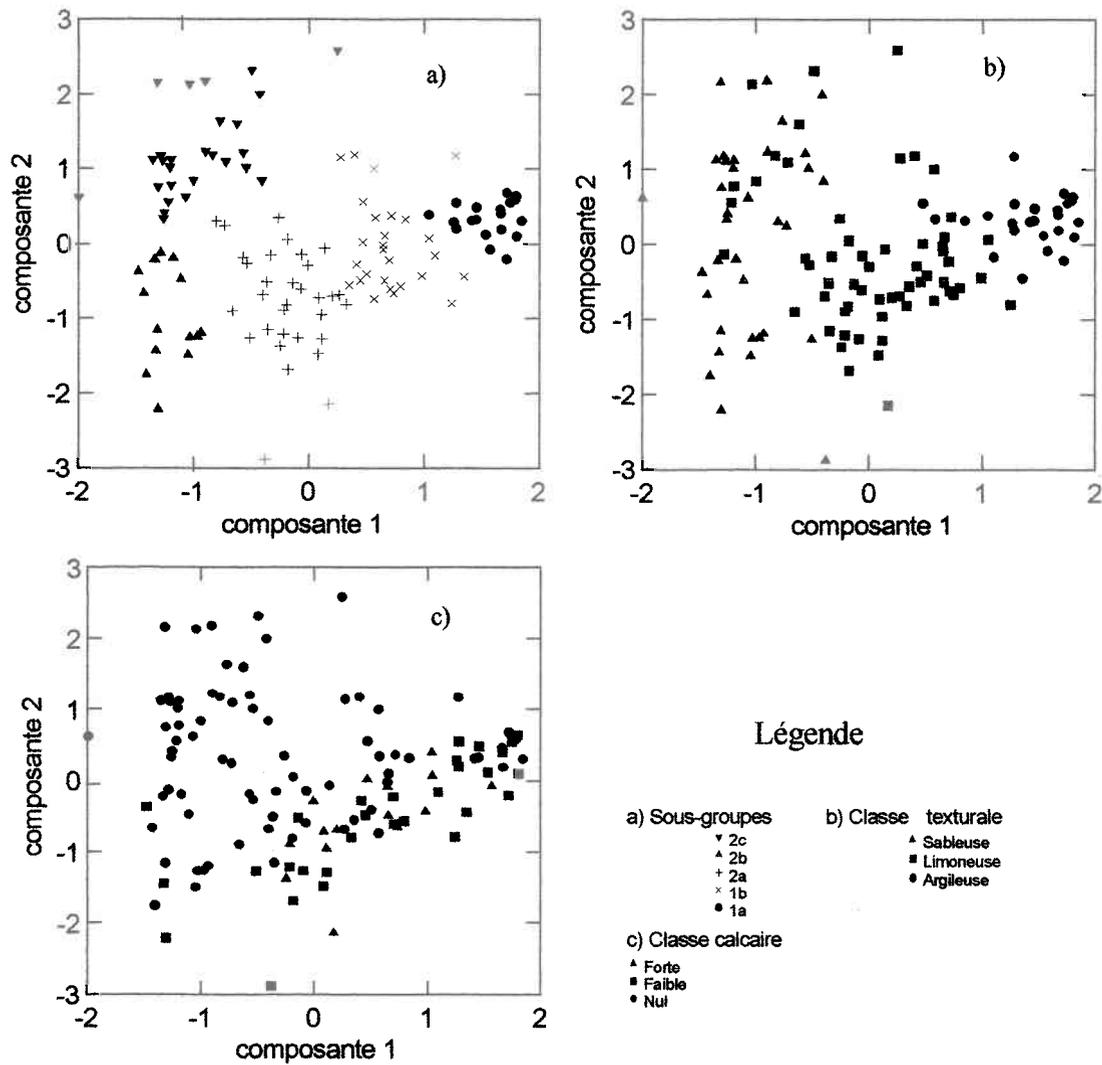
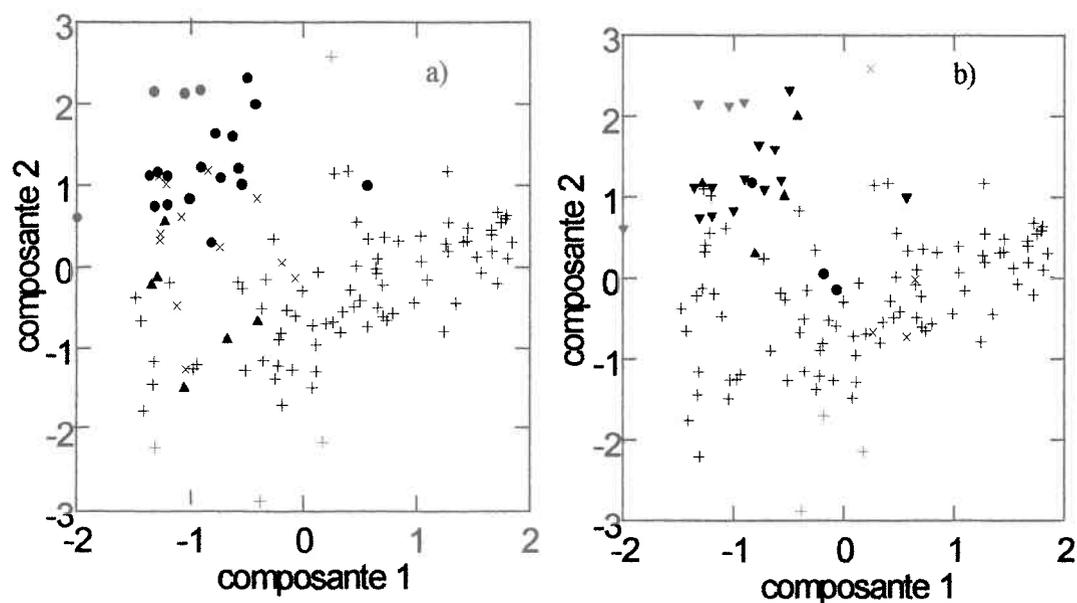


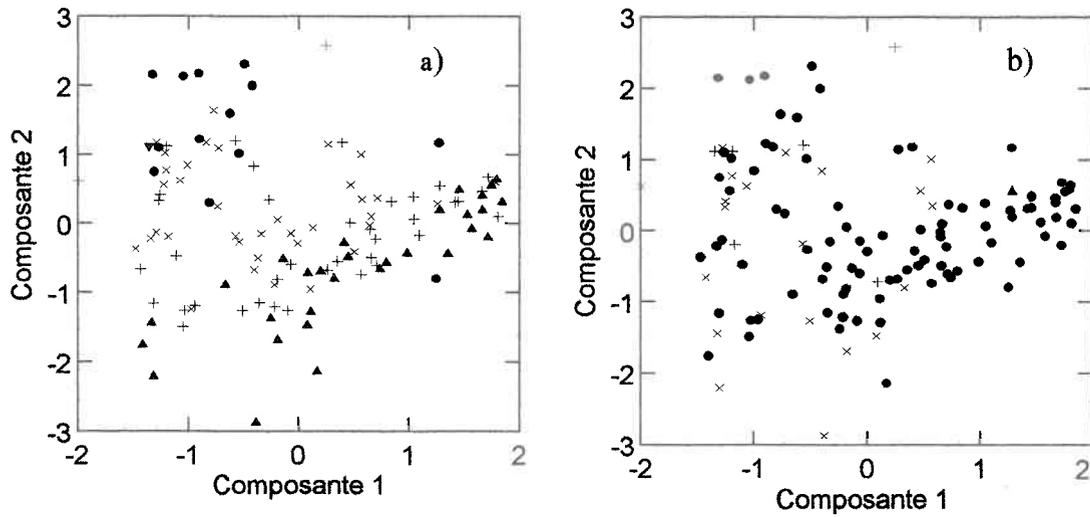
Figure 4.16: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des séries de sols selon a) les sous-groupes générés par l'analyse de groupement hiérarchique, b) la texture du sous-sol et c) la classe calcaire de la famille (pour la définition des sous-groupes consulter la figure 4.14 et la section 4.23, pour les classes consulter les tableaux 3.7 et 3.10 respectivement).



## Légende

- | a) Horizon B | b) Grand groupe        |
|--------------|------------------------|
| ▲ Bgf        | ▼ Podzol humo-ferrique |
| + Bg         | ▲ Podzol humique       |
| × Bfj        | + Gleysol humique      |
| ● Bf         | × Gleysol              |
|              | ● Brunisol sombre      |

Figure 4.17: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des séries de sols selon a) la nature de l'horizon B et b) les différents grands groupes taxonomiques (pour la définition des classes consulter les tableaux 3.8 et 3.9 respectivement).



## Légende

a) [POX/ALOX+FE0X] b) [100.PM3/ALM3]

- ▼ >20
- ▲ 10-20%
- + 10-5%
- × 5-2.5%
- 0-2.5%

Figure 4.18: Représentation de l'ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes principales jumelée à une classification des séries de sols selon deux indices de saturation en P.

Les figures 4.18 a) et b) présentent le degré de saturation en P de chacun des sols. L'indice du degré de saturation évalué à partir de l'extractif Mehlich III est beaucoup moins efficace que celui estimé à partir ceux extraits à l'oxalate d'ammonium pour bien faire la distinction entre les groupes. À partir de la figure 4.18 b), le sous-groupe 2c contient les sols avec des indices du degré de saturation les plus faibles (0 – 5 %); à l'opposé le sous-groupe 1a, riche en carbonates, contient une forte proportion de sols avec des indices élevés (10 – 20 %). Les sols des sous-groupes 2a, 2b, 1b peuvent être considérés modérément saturés en P.

#### **4.2.4.2 Analyse de variance**

Le tableau 4.14 présente une comparaison des moyennes des variables employées pour la formation des groupements de sols. Les figures 4.19, 4.20 et 4.21 montrent les différentes moyennes pour chaque sous-groupe provenant des descripteurs reliés à la désorption et à la fixation du P. Chacune des moyennes présentées ont été retransformées dans l'échelle originale des données en valeurs brutes originales.

Les variables FEM3 et PBR2 sont les seules qui ne présentent pas de moyennes significativement différentes entre les 5 sous-groupes au seuil de probabilité 0,001. Ce qui est expliqué par le fait que cette variable contribuait peu à l'explication des deux premières composantes utilisées pour le groupement hiérarchique. Pour les autres variables, il a y au moins un sous-groupe qui présente une moyenne significativement différente ( $P > 0.005$ ) de celle des autres sous-groupes. Chacun des sous-groupes est décrit sommairement avec l'aide du tableau 4.14.

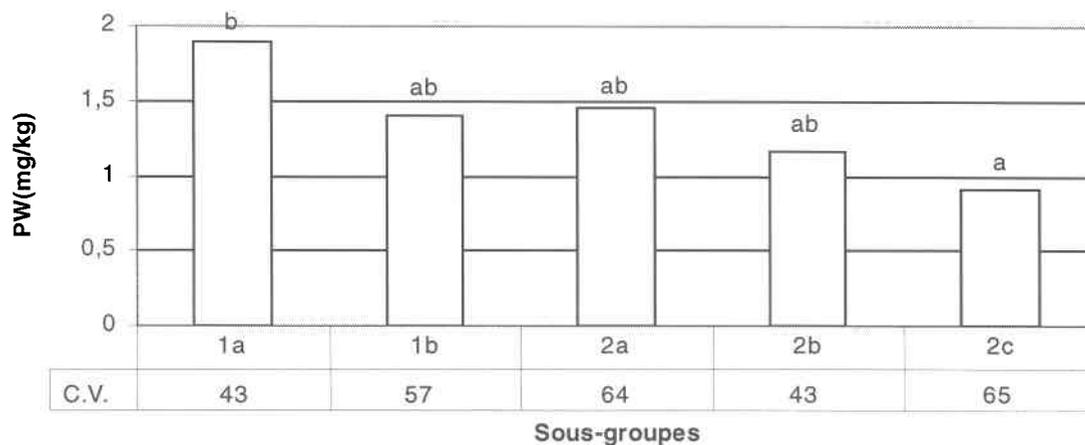


Figure 4.19: Teneurs moyennes du P soluble (PW) déterminées pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique.

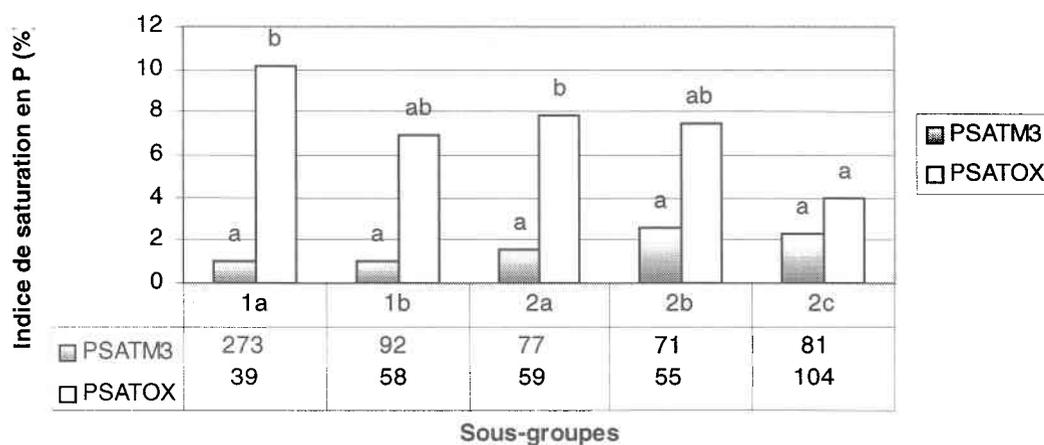


Figure 4.20: Valeurs moyennes des indices du degré de saturation en P [POX/(ALOX+FEOX)] et [100.PM3/ALM3] déterminées pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique.

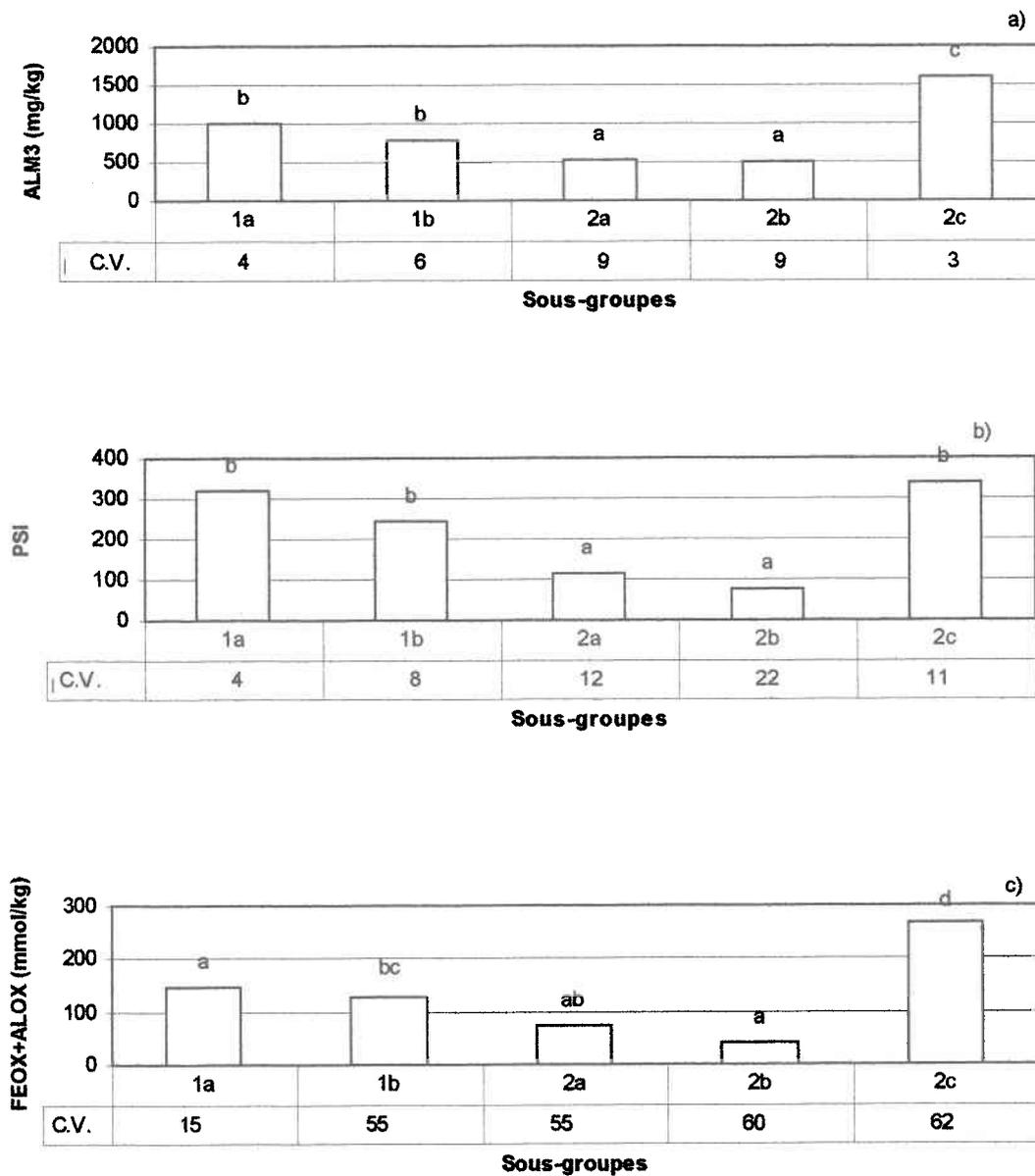


Figure 4.21: Valeurs moyennes de la capacité de fixation en P déterminées pour chacun des sous-groupes par a) ALM3 b) PSI et c) (ALOX+FEOX)

Tableau 4.14: Moyennes et coefficients de variation des 5 sous-groupes dérivés de l'analyse de groupement hiérarchique.

Variables	Statistiques	Groupe 1			Groupe 2		
		1a	1b	2a	2b	2c	
ATOT	Moyenne (%)	62.78 d	33.49 c	12.70 b	3.68 a	6.92 ab	
	C.V.	20	38	45	61	79	
STOT	Moyenne (%)	4.59 a	25.99 b	58.85 c	89.09 d	79.61 d	
	C.V.	83	41	29	7	21	
LTOT	Moyenne (%)	32.62 bc	40.53 c	28.45 b	7.23 a	13.47 a	
	C.V.	33	27	50	78	92	
CEC	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	27.94 d	17.64 c	9.02 b	4.57 a	9.02 b	
	C.V.	6	11	16	21	28	
PM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	3.90 a	5.35 ab	6.54 ab	11.06 bc	24.79 c	
	C.V.	55	51	37	33	27	
CUM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	4.31 c	2.39 b	1.86 b	0.77 a	0.88 a	
	C.V.	31	31	33	32	53	
FEM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	32.14 a	170.71 a	186.79 a	179.47 a	186.79 a	
	C.V.	6	8	8	9	10	
CAM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	3714.50 c	2670.44 c	1176.15 b	301.87 a	186.79 a	
	C.V.	4	6	8	7	25	
MNM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	30.19 b	25.58 b	18.49 b	2.90 a	4.81 a	
	C.V.	24	21	31	28	40	
KM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	428.37 d	206.44 c	79.04 a	23.10 b	33.11 b	
	C.V.	15	17	16	23	24	
MGM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	428.37 c	292.94 c	82.27 b	56.83 ab	35.87 a	
	C.V.	14	18	26	16	19	
NAM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	129.02 d	52.46 c	26.04 b	14.30 a	20.70 ab	
	C.V.	13	12	17	10	31	
POX	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	419.89 d	208.51 c	125.21 b	65.36 a	175.91 bc	
	C.V.	6	9	8	7	15	
ALOX	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	2121.76 b	1669.03 b	735.09 a	441.42 a	4315.64 b	
	C.V.	2	7	9	17	8	
FEOX	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	3714.50 c	2724.39 bc	1808.04 b	632.70 a	3102.61 c	
	C.V.	3	7	9	12	7	
PHEAU	Moyenne	7.19 c	6.84 c	6.90 c	6.21 b	5.62 a	
	C.V.	6	10	10	8	7	
PHCA	Moyenne	6.38 c	6.11 c	6.22 c	5.46 b	4.90 a	
	C.V.	7	12	11	10	7	
CORG	Moyenne (%)	0.51 a	0.40 a	0.30 a	22 a	1.16 b	
	C.V.	46	47	65	60	62	
CA	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	14.18 c	10.36 c	4.87 b	1.48 a	1.32 a	
	C.V.	7	13	22	43	56	
MG	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	8.21 d	3.95 c	1.09 b	0.31 a	0.23 a	
	C.V.	15	26	48	48	93	
K	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.46 c	0.30 b	0.13 a	0.07 a	0.12 a	
	C.V.	37	62	41	66	72	
NA	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.55 c	0.26 b	0.11 a	0.05 a	0.11 a	
	C.V.	59	110	56	38	77	
PBR2	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	89.12 a	58.56 a	62.18 a	66.69 a	53.52 a	
	C.V.	14	20	16	9	19	

a-e les moyennes des sous-groupes ayant les mêmes lettres ne diffèrent pas significativement (P=0,05) tel que déterminé par la méthode de comparaison multiple de Tukey.

#### 4.2.4.3 Description des regroupements de sols

L'indice de saturation [POX/(ALOX+FEOX)] est beaucoup plus élevé que l'indice [100.PM3/ALM3], excepté pour le groupe 2c (sol sableux brunisoliques et podzoliques);

Figure 4.20). Selon les figures 4.19 et 4.20, les 5 sous-groupes peuvent être groupés en trois catégories. Le sous-groupe 1a contient les sols qui ont une valeur de PW ( $> 1.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) et un indice de saturation PSATOX (10%) les plus élevés. Les teneurs en PW ( $< 1 \text{ mg kg}^{-1}$ ) et indices de saturation ( $< 5\%$ ) les plus faibles sont observées dans le groupe 2c. Les sous-groupes 2a, 1b et 2b ont une valeur de PSATOX et PW modérés. Dans l'ensemble, les indices de saturation PSATOX suivent la même tendance que le contenu en PW. À la figure 4.21, pour évaluer l'indice de la capacité de fixation en P des sols, la mesure (ALOX+FEOX) et ALM3 démontre une tendance similaire à l'indice de fixation PSI, contrairement à ce qui avait été observé dans la couche de surface. L'indicateur ALM3 et (ALOX+FEOX) permettent de séparer le sous-groupe 2c des autres. L'indicateur de fixation (ALOX+FEOX) semble le plus efficace pour faire la distinction de chacun des sous-groupes. Trois catégories à partir de ces indices peuvent être également formées à partir des 5 sous-groupes. Le sous-groupe 2c englobe les sols ayant un pouvoir fixateur ( $\text{PSI} > 325$ ) plus élevé. Ce sont des sols sableux brunisoliques et podzoliques. Les sous-groupes 1a et 1b contiennent les sols possédant un indice de fixation modéré (différence significative avec ALM3 et FEOX+ALOX). On constate que la capacité de fixation des sols argileux au niveau du sous-sol est plus faible et les indices de saturation plus élevés que ceux observés dans de la couche de surface. À noter que selon l'indicateur PSI, le sous-groupe 1a constitué des sols les plus argileux ne diffère pas significativement du sous-groupe 2c comme indice de fixation. Les sols ayant des indices de fixation faibles ( $\text{PSI} < 100$ ) sont principalement observés dans le sous-groupe 2a et 2b.

Les 5 sous-groupes peuvent également être décrits sur la base des autres indicateurs de fertilité. Le sous-groupe 2b regroupe les sols ayant le plus faible niveau de fertilité ( $\text{C.E.C.} = 4.6 \text{ cmol kg}^{-1}$ ), un niveau en PM3 modéré ( $11 \text{ mg kg}^{-1}$ ), un PHEAU modéré (6.2) et le plus faible niveau de CORG (0.2 %). Le groupe 2c comprend les sols possédant un niveau de fertilité faible ( $\text{C.E.C.} = 9.02 \text{ cmol kg}^{-1}$ ), un contenu en matière organique (1 %) et en PM3 ( $24 \text{ mg kg}^{-1}$ ) plus élevés. Le taux de matière organique est davantage relié à la capacité de fixation (sesquioxydes de fer et d'aluminium) qu'au degré de fertilité du sol au

niveau du sous-sol. Ces formes de fer et d'aluminium sont caractéristiques du processus de podzolisation. Les sols sont aussi caractérisés par un faible PHEAU (5.6). Le sous-groupe 2a contient des sols ayant un niveau de fertilité similaire au sous-groupe 2c, sont moyennement enrichis en PM3, ont un pauvre contenu en CORG (0.3 %) et possèdent un PHEAU élevé (6.9). Le sous-groupe 1b contient des sols avec un niveau de fertilité modéré (C.E.C.=18 cmol kg<sup>-1</sup>), un PHEAU élevé (6.8) et un contenu en matière organique similaire au sous-groupe 1a. Les sols du sous-groupe 1a détiennent un niveau de fertilité élevé (C.E.C.=28), une teneur en CORG (0.5 %), un pH très élevé (7.1), un contenu faible en PM3 (3.9 mg kg<sup>-1</sup>) et les valeurs les plus élevées en PBR2 (89 mg kg<sup>-1</sup>) et POX (419.89 mg kg<sup>-1</sup>). On note donc une différence importante dans l'estimation du P disponible selon les méthodes Mehlich III et Bray-2 dans les sols de ce sous-groupe, la mesure de PBR2 semble surestimée probablement à cause de l'abondance de calcium dans le sol. La méthode d'Olsen, en milieu basique serait un meilleur extractif que Bray pour les sols calcaires (Bowman et al., 1978).

#### **4.2.5 Analyse discriminante**

Plusieurs analyses discriminantes ont été effectuées afin de différencier les 5 sous-groupes générés par la méthode de groupement hiérarchique à partir de plusieurs sous-ensembles de variables.

##### **4.2.5.1 Analyse discriminante effectuée sur l'ensemble des variables**

Pour commencer, une analyse discriminante par étapes a été effectuée sur l'ensemble des variables. Le modèle final obtenu avec ces variables, est formé des variables MNM3, ALOX, PHEAU, CA, MG, ATOT et STOT. Seulement les fonctions de classification du modèle sont présentées au tableau 4.15, les autres résultats de l'analyse ne sont qu'énumérés ci-dessous. Les pourcentages de bonnes classifications obtenus à partir de la matrice ordinaire et celle de Jackknife, sont respectivement de 88 % et 86 %. Les sous-groupes 2a et 1b obtiennent les plus faibles pourcentages de bonnes classifications, soit 81 %. La majorité des sols mal classifiés du sous-groupe 2a se sont retrouvés dans le sous-groupe 1b. Dans l'ensemble les sols mal classifiés du sous-groupe 1b se sont retrouvés dans

le sous-groupe 1a. La différenciation entre ces trois groupes est difficile puisqu'ils ont des valeurs de PHEAU similaires. Les variables ATOT et ALOX ont un pouvoir de discrimination important dans la différenciation des sous-groupes. Les équations de classifications pour chacun des sous-groupes sont présentées au tableau 4.15

Tableau 4.15: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante sur l'ensemble des variables

Variables	Sous-groupes				
	1a	1b	2a	2b	2c
Constante	-304.96	-255.72	-229.05	-199.57	-251.21
Ln (MNM3+1)	20.15	18.86	18.05	14.71	17.66
Log (ALOX)	29.34	28.59	26.61	24.71	32.27
PHEAU	28.78	25.84	25.59	23.38	22.19
Ln (CA+1)	-18.19	-14.34	-15.39	-19.18	-21.34
Ln (Mg+1)	26.55	22.58	17.15	17.59	16.70
ATOT	1.47	1.05	0.92	0.91	0.95
STOT	0.85	0.81	0.88	1.00	1.02

Les deux premières fonctions canoniques ont été conservées pour l'interprétation des sous-groupes. Ainsi, la première fonction est surtout expliquée par le pourcentage d'argile et le pH à l'eau (fertilité et réaction du sol). La deuxième fonction est expliquée par l'aluminium extrait à l'oxalate d'ammonium (capacité de fixation en P), sur l'axe opposé par le contenu en calcium extrait à l'acétate d'ammonium (présence de carbonates). La variable importante ALOX ne semble pas bien différencier les sous-groupes 1a et 1b étant donné que leur contenu moyen est similaire. Et la première fonction, expliquée par PHEAU ne permet pas de bien différencier les sous-groupes 2a et 1b, étant donné qu'ils ont des valeurs de pH identique (données non présentées).

#### 4.2.5.2 Analyse discriminante effectuées sur les variables modernes

Une autre analyse discriminante par étapes a été effectuée sur les variables extraites par Mehlich III, celles extraites par l'oxalate d'ammonium et deux indicateurs reliés à la

fixation et désorption du P. Après amélioration, le modèle final était formé des variables CAM3, ALOX, PHEAU, ATOT et STOT. Le pourcentage de classification a diminué légèrement; les résultats obtenus de bonnes classifications de la matrice ordinaire et de Jackknife (Tableau E.2), étaient respectivement de 87 % et 85 %. Les variables ALOX et ATOT ont un pouvoir de discrimination important dans la différenciation des sous-groupes. Les sous-groupes 1b, 2a et 2b obtiennent encore les plus faibles pourcentages de bonnes classifications, soit 81% (Tableau E.2). Les sols mal classifiés provenant du sous-groupe 1b se sont retrouvés dans le sous-groupe 1a. Les sols mal classifiés du sous-groupe 2a se sont retrouvés dans les sous-groupes 1b, 2b et 2c (Tableau E.2). Les sols reclassifiés dans un autre sous-groupe étaient principalement fonction de la texture du sol. Des sols de texture sableuse appartenant au sous-groupe 2b et 2a se sont retrouvés dans les sous-groupes 2c et 2b (Tableau E.4). De plus, certains sols ayant un horizon sableux riche en sesquioxydes de fer et aluminium provenant des sous-groupes 2b et 2a, ont été reclassifiés dans le sous-groupe 2c. Le tableau 4.16 présente les équations de classification pour chacun des sous-groupes. Les deux principales fonctions canoniques ont été conservées pour l'interprétation des sous-groupes. Ainsi, la première fonction est surtout expliquée par le pourcentage d'argile et de sable. La deuxième fonction est bien expliquée par l'aluminium extrait à l'oxalate d'ammonium et à l'opposé, très faiblement, par le contenu en calcium extrait par Mehlich III. La combinaison de ATOT et STOT créant une gradation de la fertilité dans le sol semble efficace pour bien discriminer les sous-groupes. Par contre, la variable importante ALOX dans la deuxième fonction, ne peut pas bien discriminer les sous-groupes 1b et 2a (données non présentées).

Tableau 4.16: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes provenant d'une analyse discriminante effectuée sur les variables modernes

Variables	Sous-groupes				
	1a	1b	2a	2b	2c
Constante	-193.49	-167.56	-153.91	-141.11	-167.73
Ln(CAM3)	7.26	8.03	7.46	6.12	4.94
Ln (ALOX)	17.10	17.30	15.93	15.35	21.63
PHEAU	18.55	16.35	16.10	13.98	12.37
ATOT	0.92	0.54	0.39	0.42	0.37
STOT	0.38	0.40	0.52	0.70	0.67

#### 4.2.5.3 Analyse discriminante effectuée sur les variables traditionnelles

Pour terminer, une autre analyse discriminante par étapes a été effectuée sur les variables traditionnelles seulement. Le modèle final obtenu est formé des variables PHEAU, CORG, CA, ATOT, STOT et MG. Le pourcentage de bonnes classifications a diminué; les résultats provenant de la matrice ordinaire et celle de Jackknife (Tableau E.3) étaient respectivement de 82 % et 79 %. Les variables ATOT et CORG ont un pouvoir de discrimination important dans la différenciation des sous-groupes. Le sous-groupe 2a obtient le pourcentage de bonnes classifications le plus faible soit de 72% (Tableau E.3). Les sols mal classifiés du sous-groupe 2a se sont retrouvés dans les sous-groupes 2b et 1b (Tableau E.4). On constate que le sous-groupe 2c contenant les sols sableux riches en sesquioxydes de fer et d'aluminium obtient un plus faible pourcentage de bonnes classifications que pour les modèles incorporant des indicateurs modernes. Des sols du sous-groupe 2a sableux ayant un horizon Bf ou Bfj ont été reclassifiés principalement dans le sous-groupe 2b (Annexe E). Le tableau 4.17 présente les équations de classification pour chacun des sous-groupes. Les deux principales fonctions canoniques discriminantes ont été retenues. La première fonction est principalement expliquée par le pourcentage de sable. La deuxième fonction est principalement expliquée par le contenu en calcium extrait par l'acétate d'ammonium et sur l'axe opposé, principalement par le pourcentage d'argile et la matière organique. La variable STOT de la première fonction et ATOT et CORG (exprimant la capacité de

fixation), de la deuxième fonction, ne semblent pas bien discriminer les sous-groupes 2c et 2b (données non présentées). Le contenu en CA des sols de ces deux sous-groupes est similaire et la variation de cet indicateur à l'intérieur de ces groupes est grande (C.V.=43 % et 56 %).

Tableau 4.17: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes provenant des variables traditionnelles

Variables	Sous-groupes				
	1a	1b	2a	2b	2c
Constante	-147.86	-109.77	-101.17	-100.18	-92.99
PHEAU	25.14	22.38	22.35	20.95	19.51
Ln(CORG+1)	11.29	9.75	10.65	13.44	21.46
Ln(CA+1)	-8.86	-5.00	-7.06	-12.52	-13.77
ATOT	1.10	0.71	0.60	0.67	0.69
STOT	0.51	0.49	0.58	0.77	0.75
Ln(MG+1)	26.90	22.34	17.46	17.75	17.06

#### 4.2.6 Résumé

À partir de l'analyse en composantes principales, les deux premières composantes principales ont été retenues. La première est liée à la texture et au degré de fertilité du sol. La seconde composante est expliquée par la capacité de fixation du P. L'interprétation des 5 sous-groupes obtenus par l'analyse de groupement hiérarchique a été effectuée grâce à l'analyse de variance et l'ordination en espace réduit. Le groupe 2c contient les séries de sols les plus fixateurs de P (PSI=340), ils ont de plus une texture sableuse ou loameux-grossier et une texture de surface de classe 1, 2 et 3 (Tableau 3.6). Plusieurs sols appartiennent à l'ordre des podzols et des brunisols. Les séries de sols du sous-groupe 2b ont une texture plus sableuse que le sous-groupe précédent et une texture de surface de classe 2 et 3. Leur pouvoir de fixation du P est très faible (PSI=74) malgré la présence de sols avec horizon Bgf et Bfj. Le degré de saturation PSATOX (7.5 %) et le contenu en PW (> 1 mg kg<sup>-1</sup>) sont plus élevés que le groupe précédent. Le sous-groupe 2a contient des

séries de sol avec une texture plus loameuse et une texture de surface de classe 1 et 2; les deux tiers des sols ont un substratum calcaire. Ces séries de sols ont une capacité de fixation supérieure (PSI=113) au sous-groupe 2b, par contre le degré de saturation (PSATOX=8 %) et PW (1.5 mg kg<sup>-1</sup>) sont légèrement plus élevés. Les séries de sols du sous-groupe 1b ont une texture loameuse à argileuse et une texture de surface de classe 3 et 4. Un peu moins de la moitié des sols ont un substratum calcaire. Les sols de ce sous-groupe présentent également une meilleure capacité de fixation (PSI=250) et un degré de saturation en P similaire (PSATOX=6.89 %) et un niveau plus élevé en Pw (1.41 mg kg<sup>-1</sup>) que le sous-groupe 2b. Les séries de sol appartenant au sous-groupe 1a ont une texture argileuse et une texture de surface de classe 4 et 5 et un pouvoir de fixation (PSI=320) semblable à celui du groupe 2c, mais un degré de saturation (PSATOX=10%) et un niveau de PW (>1.5 mg kg<sup>-1</sup>) significativement plus élevés que le sous-groupe 2c.

Il semble important de connaître la capacité de fixation du P du sous-sol pour une approche de gestion environnementable. Si l'on compare les mesures de la capacité de fixation de la couche de surface avec celle du sous-sol, on constate que les sols de nature podzolique ont des valeurs de PSI similaires dans le sous-sol aux les sols argileux (classe 4 et 5), leur indice de saturation et contenu en PW est plus faibles. Les sols argileux montrent aussi une forte capacité de fixation en surface, mais une augmentation de la saturation en P et avec quand même une diminution du PW dans le sous-sol. Les propriétés intrinsèques des sols marqués par le processus podzolique pourraient diminuer leur vulnérabilité à la pollution de l'eau par le P car leur sous-sol semble jouer le rôle de tampon, pour un mouvement de l'eau uniforme dans le sol.

Les variables retenues par l'analyse discriminante comme étant les plus efficaces pour discriminer les différents sous-groupes sont ATOT, pour les indicateurs traditionnels et ALOX, pour les indicateurs modernes. Le modèle établi à partir des indicateurs modernes est plus efficace que celui avec les indicateurs traditionnels. Dans le modèle avec les indicateurs traditionnels, la variable représentant la capacité de fixation en P, CORG est

plus variable à l'intérieur de chacun des groupes (C.V.=46 % à 62%) que la variable ALOX provenant du modèle avec indicateurs modernes (C.V.=2 % à 17 %).

### **4.3 Groupement effectué sur les séries de sols à partir des descripteurs du substratum**

#### **4.3.1 Relation entre les variables étudiées**

L'examen des coefficients de corrélation du substratum, exposés dans le tableau 4.18, a permis de mieux connaître les relations existantes entre les variables, surtout celles touchant la capacité de fixation et le degré de saturation en P. La variable PSI, indicateur de la capacité de fixation en P, présente une relation significative avec plusieurs descripteurs mais principalement avec ALOX, POX, FEOX, STOT, ATOT et les bases échangeables extraites à l'acétate d'ammonium. Ceci démontre la forte contribution des sesquioxydes de fer et d'aluminium et de la texture dans la capacité de fixation du P au niveau du substratum des sols de la plaine de Montréal. La variable PSI est davantage liée aux sesquioxydes de fer et d'aluminium extraits à l'oxalate d'ammonium qu'à ceux extraits au Mehlich III (ALM3). La variable ALOX est liée positivement aux variables POX, ATOT et CEC. Pour sa part, la variable FEOX est liée significativement aux mêmes variables que ALOX. La variable PW présente peu de relations significatives avec les autres descripteurs à l'exception de PBR2 ( $r=0.42$ ). La variable ALM3 est négativement liée au pH du sol et positivement aux variables PBR2, PM3 et POX. Elle est reliée aux éléments exprimant la disponibilité en phosphore, ce qui semble à première vue contradictoire pour une variable estimant le pouvoir fixateur en P [Giroux et Tran, 1996]. La variable POX est reliée aux variables relatives à la richesse en éléments et à la texture argileuse du sol telles que ATOT, CEC, KM3, CUM3, MGM3, CAM3 et les bases échangeables. Elle est aussi liée positivement aux indicateurs de la fixation en P comme PSI, ALOX et FEOX.

Tableau 4.18: Coefficients de corrélation de Pearson du substratum entre les propriétés du sol et les indicateurs relatifs au phosphore

Variables	PSI	PW	PM3	AIM3	POX	ALOX	FEOX	PBR2	PSATM3	PSATOX
PSI	1.00	0.21	-0.04	0.42 ***	0.81 ***	0.82 ***	0.71 ***	0.28	-0.12	-0.03
PW	0.21	1.00	0.22	0.35 *	0.26	0.32	0.18	0.42 ***	-0.08	-0.10
PM3	-0.04	0.22	1.00	0.42 ***	-0.12	0.14	0.02	0.28	0.56 ***	-0.34 *
CUM3	0.59 ***	0.24	-0.20	0.11	0.68 ***	0.45 ***	0.49 ***	0.09	-0.10	0.20
MNME3	0.22	-0.04	-0.41 ***	-0.30	0.34 *	-0.03	0.19	-0.02	0.09	0.30
FEM3	0.21	0.14	0.13	0.31	0.23	0.17	0.47 ***	0.15	-0.08	-0.17
CAMB3	0.41 ***	-0.05	-0.53 ***	-0.21	0.55 ***	0.14	0.35 *	-0.02	-0.02	0.39 ***
KM3	0.53 ***	0.14	-0.19	0.29	0.69 ***	0.36 **	0.42 ***	0.30	-0.05	0.28
MGM3	0.54 ***	0.37 **	-0.15	0.25	0.64 ***	0.55 ***	0.56 ***	0.31	-0.21	0.03
NAM3	0.59 ***	0.42 ***	-0.23	0.28	0.68 ***	0.55 ***	0.53 ***	0.35 *	-0.23	0.11
ALM3	0.42 ***	0.35 *	0.42 ***	1.00	0.39 ***	0.63 ***	0.41 ***	0.55 ***	-0.07	-0.28
POX	0.81 ***	0.26	-0.12	0.39 ***	1.00	0.77 ***	0.68 ***	0.30	-0.14	0.29
ALOX	0.82 ***	0.32	0.14	0.63 ***	0.77 ***	1.00	0.73 ***	0.34 *	-0.19	-0.24
FEOX	0.71 ***	0.18	0.02	0.41 ***	0.68 ***	0.73 ***	1.00	0.26	-0.08	-0.37 **
PHEAU	0.19	-0.09	-0.48 ***	-0.46 ***	0.29	-0.09	0.07	-0.09	0.04	0.41 ***
PHCA	0.18	-0.13	-0.50 ***	-0.42 ***	0.33	-0.07	0.07	-0.11	0.03	0.44 ***
CORG	0.43 ***	0.16	0.14	0.18	0.39 ***	0.42 ***	0.39 ***	-0.08	0.00	-0.05
CA	0.47 ***	-0.04	-0.49 ***	-0.23	0.61 ***	0.23	0.38 ***	-0.05	-0.01	0.36 **
MG	0.67 ***	0.31	-0.11	0.36 *	0.79 ***	0.62 ***	0.60 ***	0.39 ***	-0.13	0.15
K	0.63 ***	0.25	-0.07	0.32	0.81 ***	0.65 ***	0.56 ***	0.21	-0.12	0.18
NA	0.42 ***	0.43 ***	-0.01	0.27	0.49 ***	0.41 ***	0.33	0.27	-0.10	0.10
CEC	0.64 ***	0.33	-0.08	0.39 ***	0.76 ***	0.63 ***	0.57 ***	0.35 *	-0.10	0.11
PBR2	0.28	0.42 ***	0.28	0.55 ***	0.30	0.34 *	0.26	1.00	0.03	-0.10
ATOT	0.69 ***	0.26	-0.12	0.36 **	0.85 ***	0.69 ***	0.63 ***	0.23	-0.14	0.16
STOT	-0.73 ***	-0.19	0.26	-0.19	-0.86 ***	-0.59 ***	-0.62 ***	-0.29	0.11	-0.26

\*, \*\*, \*\*\* niveaux de signification dans l'ordre P=0.05, P=0.01 et P=0.001, respectivement (n=117)

Contrairement aux autres couches, il y a peu de relations entre les indicateurs de la saturation en P et les indicateurs de la capacité de fixation du P (PSI, (ALOX+FEOX), ALM3). En théorie la présence de carbonates devrait augmenter la valeur de PSI et pourrait contribuer à diminuer le taux de saturation. Mais ici il se produit l'inverse parce que c'est principalement l'argile et les sesquioxydes qui expliquent la valeur de PSI et les sesquioxydes sont moins actifs avec le P dans les sols avec un substratum calcaire, puisque la majorité n'ont pas un pH supérieure à 8 (Lindsay, 1979).

### 4.3.2 Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales a été effectuée sur la matrice de corrélation des vingt-cinq variables. Les différentes valeurs propres et le pourcentage de la variance expliquée, pour chacune des composantes extraites sont présentés au tableau 4.19.

Tableau 4.19: Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée et cumulative pour chacune des composantes extraites.

Composantes	Valeurs propres	Variance (%)	
		expliquée	cumulée
1	11.62	46.50	46.50
2	4.36	17.46	63.96
3	1.54	6.15	70.11
4	1.09	4.36	74.47
5	1.07	4.27	78.74
6	0.80	3.19	81.93
7	0.71	2.85	84.78
8	0.59	2.36	87.14
9	0.56	2.25	89.39
10	0.48	1.91	91.3
11	0.42	1.67	92.97
12	0.32	1.29	94.26
13	0.23	0.90	95.16
14	0.21	0.85	96.01
15	0.20	0.81	96.82
16	0.19	0.75	97.57
17	0.12	0.49	98.06
18	0.10	0.40	98.46
19	0.09	0.36	98.82
20	0.08	0.30	99.12
21	0.06	0.22	99.34
22	0.05	0.22	99.56
23	0.05	0.19	99.75
24	0.03	0.13	99.88
25	0.03	0.11	100.00

Les valeurs propres des premières composantes sont élevées et représentent à elles seules une grande part de la variabilité contenu dans la matrice de données. À partir du test du talus (*scree test*), le nombre de composantes interprétables a été déterminé. La figure 4.22, représente graphiquement, en ordre d'extraction, les valeurs propres de chacune des composantes.

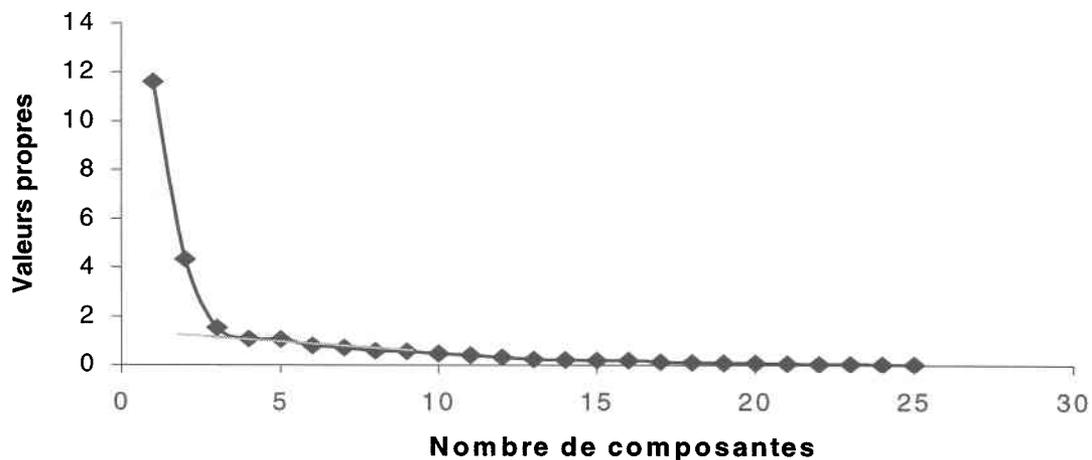


Figure 4.22: Solution graphique du test du talus (*scree test*) pour déterminer le nombre de composantes interprétables

Cette figure a permis de déduire que trois composantes suffisent pour résumer l'information provenant de la matrice de données. Les autres composantes extraites n'ont pas été retenues, car elles ne représentaient pas de dimensions importantes et pertinentes pour l'étude. Le pourcentage de variance totale expliquée par les 3 premières composantes est de 70,1 %, défini par l'ensemble des descripteurs étudiés. L'étude des différentes composantes conservées s'est fait à partir la matrice des saturations (Tableau 4.20).

Les variables STOT, ATOT, PSI, POX, CEC, PSI et FEOX expliquent bien la première composante principale et sont liées à la texture, aux éléments liés à la fertilité du sol et au pouvoir fixateur en P du sol. D'autres variables comme CAM3, CA, PHCA et PHEAU explique une partie de la composante principale bien qu'elles caractérisent aussi la

deuxième composante. La deuxième composante semble bien caractérisée par les variables ALM3 et PM3. Les descripteurs de sol expliquant la deuxième composante sont reliés à la capacité de fixation en P des sols, au contenu en calcium (carbonates) et à la réaction du sol. La variable PBR2 est moyennement représentée par la deuxième et troisième composante. La troisième composante est plus faiblement expliquée par les variables PW et CORG, exprimant le contenu en phosphore soluble et la vulnérabilité à la désorption en P.

Tableau 4.20: Matrice des saturations des composantes conservées.

Variables	Composantes			
	1	2	3	4
1 ATOT	0.91	0.12	-0.08	-0.14
2 STOT	-0.94	0.09	0.02	0.10
3 PSI	0.78	0.24	-0.20	-0.20
4 PW	0.31	0.43	0.47	0.27
5 CEC	0.88	0.17	0.03	-0.04
6 PM3	-0.21	0.67	0.00	0.20
7 CUM3	0.78	-0.12	-0.23	0.26
8 FEM3	0.30	0.25	-0.30	0.77
9 CAM3	0.70	-0.57	-0.08	0.05
10 MNM3	0.47	-0.62	0.14	0.19
11 KM3	0.75	-0.12	0.06	0.08
12 MGM3	0.77	0.15	0.10	0.00
13 NAM3	0.83	0.06	0.32	0.02
14 ALM3	0.30	0.80	0.07	-0.00
15 POX	0.90	0.13	-0.09	-0.16
16 ALOX	0.68	0.53	-0.16	-0.30
17 FEOX	0.70	0.30	-0.30	-0.06
18 PHEAU	0.46	-0.76	0.18	0.12
19 PHCA	0.48	-0.77	0.11	0.08
20 CORG	0.45	0.21	-0.53	0.17
21 CA	0.74	-0.55	-0.13	-0.05
22 MG	0.91	0.11	0.11	-0.04
23 K	0.87	0.07	-0.04	-0.13
24 NA	0.62	0.12	0.46	0.04
25 PBR2	0.31	0.47	0.53	0.12

Elle a de plus un plus faible pourcentage de variance expliquée que les deux premières composantes. La variable PW est expliquée faiblement par les trois premières composantes. La première et la deuxième composantes semblent avoir un rôle important dans la formation des groupes de sols. La variable FEM3 n'est pas impliquée dans la caractérisation des trois premières composantes. En outre, l'examen de la matrice des

saturation montre que les deux premières composantes semblent intéressantes pour exprimer le comportement intrinsèque des sols. La projection des séries de sols sur la troisième composante avec la première ou la deuxième composante est moins efficace dans la distinction des sols. Seuls les échantillons des séries PV, DA et MA (Annexe B) à substratum argileux sont isolés des autres et peuvent être qualifiés de riches en P soluble. Les deux premières composantes ont été conservées pour des fins d'interprétation et pour effectuer le classement des séries de sols en groupe de fertilité. Ces deux composantes représentent à elles seules 63,9 % de la variance totale, définie par l'ensemble des descripteurs étudiés. La figure 4.23 offre une projection graphique des saturations des composantes dans un espace délimité par les deux premières composantes.

Les variables expliquant la première composante sont liées à la texture, au degré de fertilité du sol et à la capacité de fixation. Les sols sableux occupent la partie négative de l'axe, les sols loameux la partie centrale (près de zéro) et les sols argileux plus fixateurs la partie positive. Les descripteurs expliquant la seconde composante sont reliés à la réaction du sol et à la capacité de fixation, ils permettent d'identifier sur la partie négative de l'axe les sols riches en calcium (présence de calcaire) et sur la partie positive, les sols plus fixateurs.

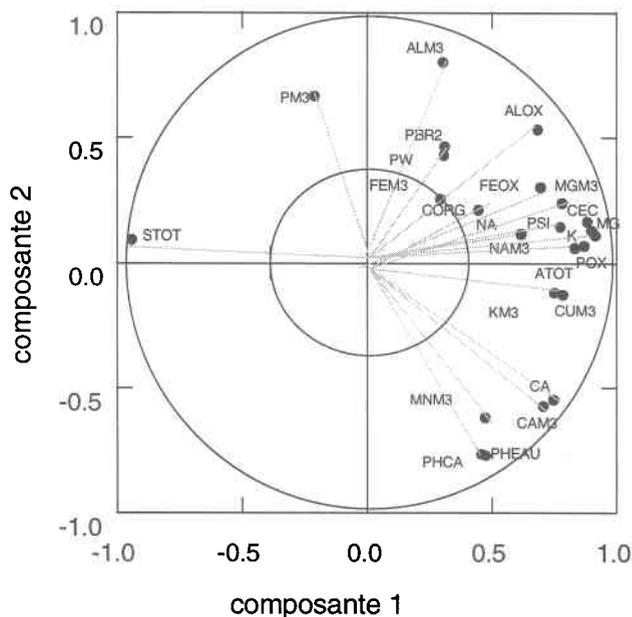


Figure 4.23: Représentation des variables dans le plan défini par les deux premières composantes (consulter le tableau 4.20 pour connaître le symbole numérique des variables).

### 4.3.3 Groupement hiérarchique

Les résultats de la méthode de groupement sont présentés à la figure 4.24 par un dendogramme simplifié. Le détail des différentes séries de sols, présentes dans chacun des sous-groupes, est exposé dans l'Annexe F. La figure 4.25 représente graphiquement la distance euclidienne des différents niveaux de fusion des groupements tout le long de la structure hiérarchique du dendogramme. Le dendogramme démontre, au niveau de généralisation le plus élevé (distance euclidienne >35), deux ensembles distincts de sols représentant la capacité de fixation du P, soit sous la branche droite (groupes 2 et 3), les types de sols fixateurs et, sous la branche gauche (groupe 1), les types de sols moins fixateurs et/ou plus enclins à la désorption, cela peut dépendre des formes de P et pas

nécessairement d'une fertilisation. Le second niveau exprime la nature calcaire /non calcaire du substratum tandis que le troisième niveau exprime la texture du sol. Ainsi, le troisième niveau de généralisation permet de subdiviser les 3 groupes de séries de sols en 5 sous-groupes.

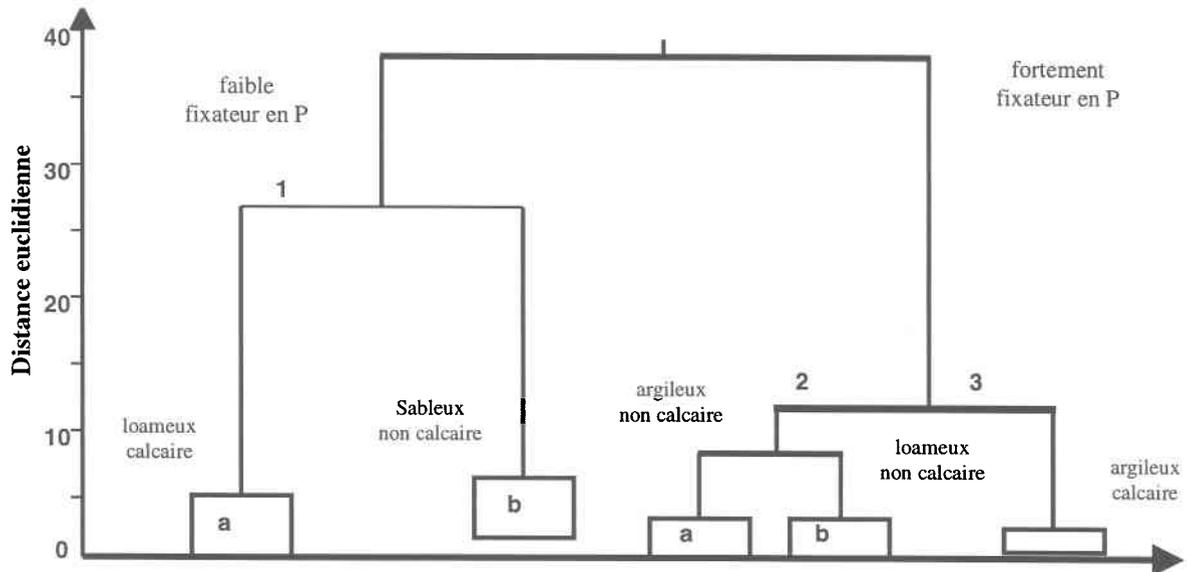


Figure 4.24: Dendrogramme simplifié obtenu selon la méthode de Ward à partir des pointages des deux premières composantes.

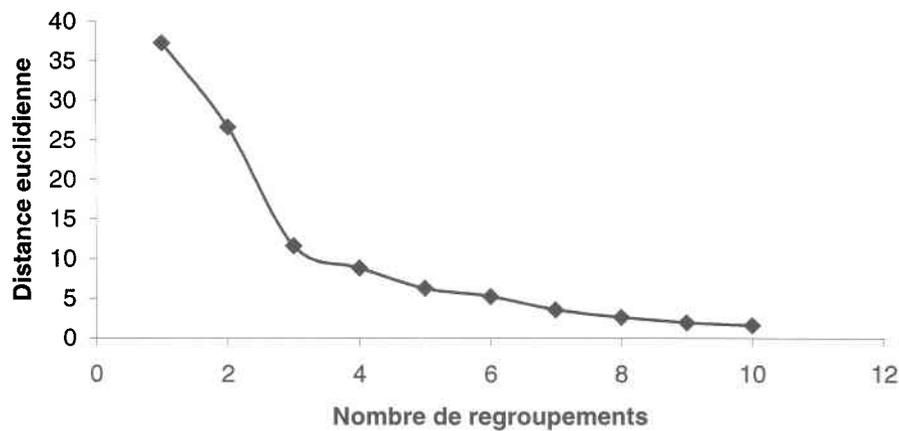


Figure 4.25: Solution graphique pour déterminer le nombre optimum de groupes.

Le groupe 2 peut être subdivisé en deux sous-groupes. Les séries de sols appartenant au sous-groupe 2a ont une texture argileuse et un substratum non calcaire. Les sols du sous-groupe 2b ont une texture plus loameuse, un substratum non calcaire et compte des sols appartenant aux podzols et brunisols. Le groupe 3 possède des sols avec une texture argileuse et un substratum calcaire. Le groupe 1 peut être subdivisé en deux sous-groupes. Les sols appartenant au groupe 1a ont une texture loameuse, un substratum calcaire et certains se sont développés sur un till calcaire ou matériel incorporant des fragments ou graviers. Le groupe 1b comprend des sols appartenant aux podzols et ayant une texture sableuse et un substratum non calcaire.

Pour interpréter la partition du dendogramme et mettre en évidence les relations entre les groupes de séries de sols et les descripteurs de sols, une superposition du dendogramme et d'une ordination dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes a été utilisée. De plus, une analyse de variance effectuée sur les descripteurs de sols, a permis de cerner et de décrire les indicateurs de sols qui présentent des différences significatives entre chacun des groupes.

#### **4.3.4 Interprétation des groupements**

##### **4.3.4.1 Ordination des pointages dans l'espace réduit défini par les composantes principales sélectionnées**

L'ordination des pointages dans l'espace réduit défini par les deux premières composantes, permet de mettre en évidence les caractéristiques (section 3.2.2) de sols non utilisées dans l'analyse en composantes principales, pour qualifier davantage chacun des sous-groupes. La figure 4.26 a) représente la position des différents sous-groupes dans l'espace réduit, Elle permet de constater que les sous-groupes semblent dans l'ensemble bien distincts l'un de l'autre. Le pouvoir de fixation du P est partagé entre la composante 1 et 2, le gradient s'établit selon une diagonale. Les sols des sous-groupes 2a et 3, situés dans la partie supérieure du premier axe, sont les plus fixateurs en P.

À l'opposé, les sous-groupes 1b et 1a englobent les sols les moins fixateurs de P. Les sols appartenant au sous-groupe 2b, peuvent être qualifiés comme moyennement fixateurs. De plus, les groupes 1a et 3 présentent un fort contenu en carbonates. La figure 4.26 b) représente les classes du contenu en carbonates des sols. Le sous-groupe 1a semble majoritairement représenté par des sols fortement calcaires. Les sols faiblement calcaires semblent davantage répertoriés dans le groupe 3. La figure 4.27 c) expose le degré de saturation en P de chacun des sols. Les indices du degré de saturation, évalués à partir de l'extractif Mehlich III, n'apportent pas davantage d'information que dans le sous-sol. Le groupe 1b contient des sols avec un degré de saturation passant de faible à élevé. Pour sa part, les sols du sous-groupe 2b ont les indices les plus faibles (5 – 10 %). À l'opposé, les sous-groupes 2a, 1a et 3 possèdent des sols ayant des indices très élevés (>10 %) et un substratum calcaire.

#### **4.3.4.2 Analyse de variance**

La comparaison des moyennes des variables employées pour la formation des groupements de sols est exposée dans le tableau 4.21. Les figures 4.28, 4.29 et 4.30 présentent les différentes moyennes pour chaque sous-groupe provenant des descripteurs reliés à la désorption et à la fixation en P. Chacune des moyennes énoncées ont été retransformées dans l'échelle originale des données.

La variable FEM3 est la seule qui ne présente pas de moyennes significativement différentes entre les 5 sous-groupes au seuil de probabilité 0,001. Les autres variables ont des moyennes significativement différentes pour chacun des sous-groupes.

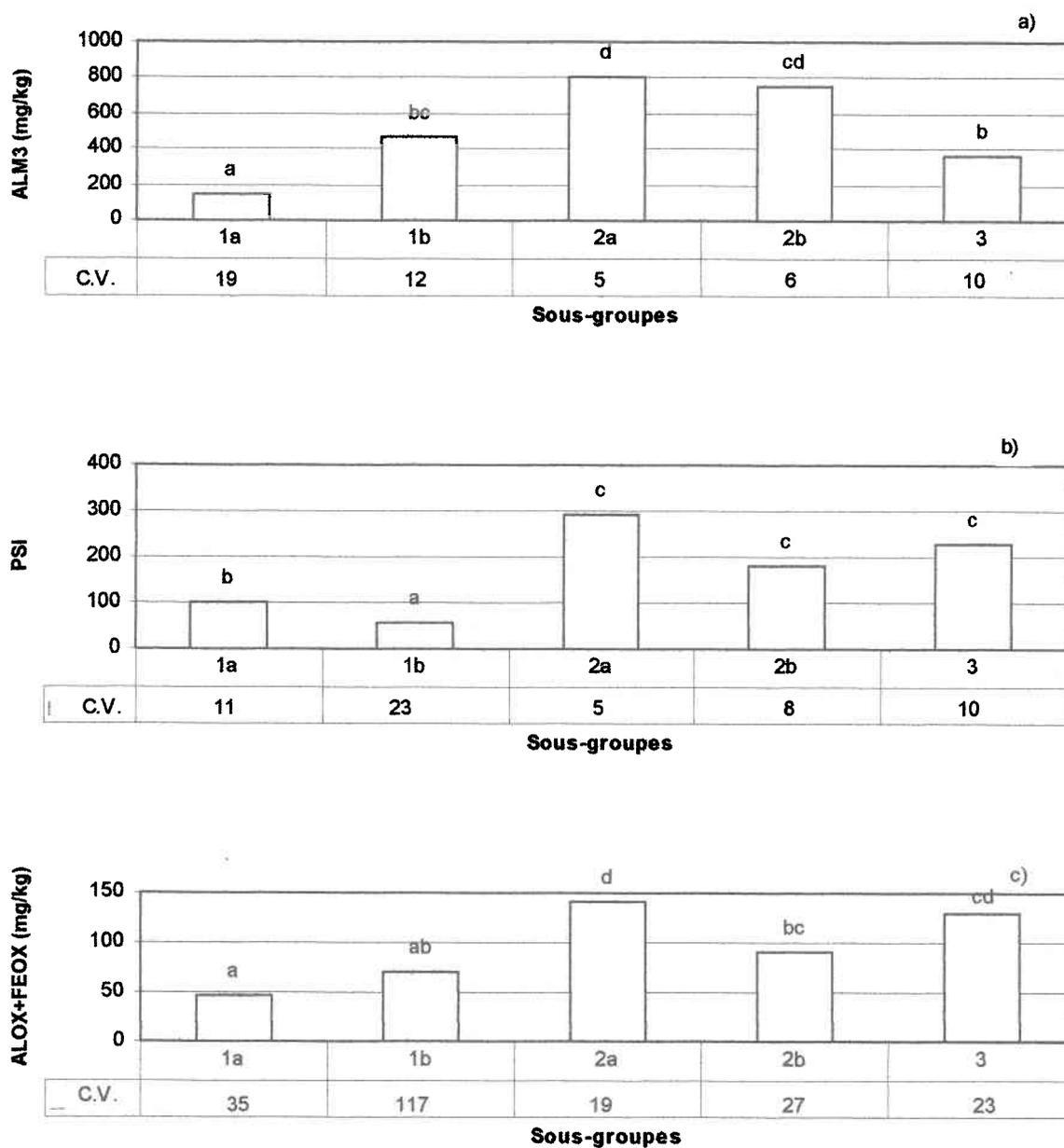


Figure 4.28: Valeurs moyennes de la capacité de fixation en P déterminées pour chacun des sous-groupes par a) ALM3, b) PSI et c) (ALOX+FEOX)

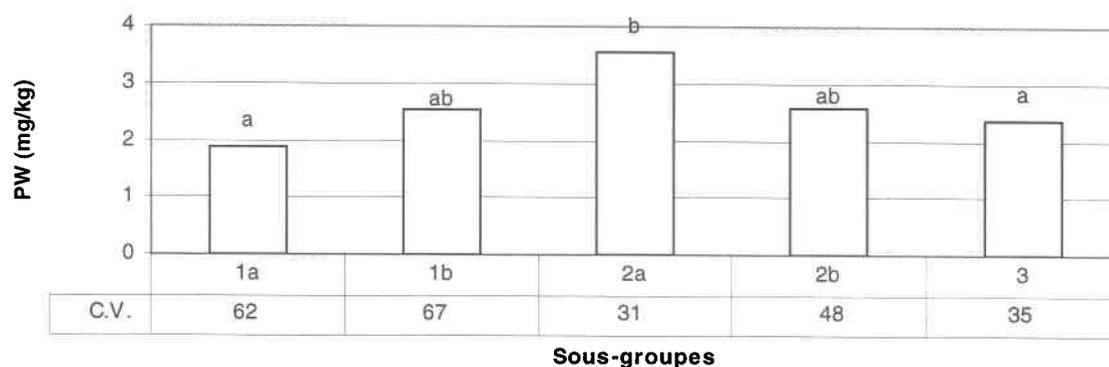


Figure 4.29: Valeurs moyennes du P soluble (PW) déterminées pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique.

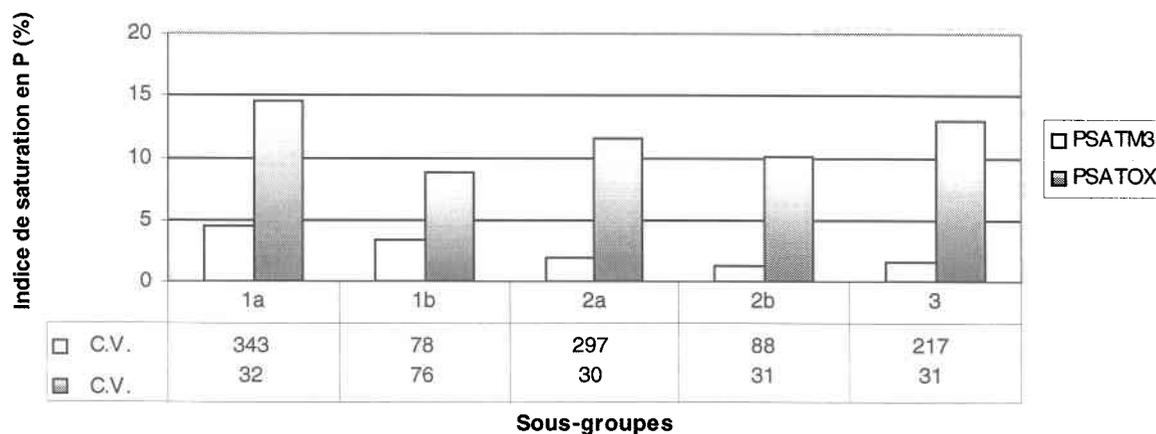


Figure 4.30: Valeurs moyennes du degré de saturation en P  $[POX/(ALOX+FEOX)]$  et  $[100.PM3/ALM3]$  déterminées pour chacun des sous-groupes issus de l'analyse de groupement hiérarchique.

Tableau 4.21: Moyennes et coefficients de variation des 5 sous-groupes dérivés de l'analyse de groupement hiérarchique.

Variables	Statistiques	Groupe 1		Groupe 2		Groupe 3
		1a	1b	2a	2b	
ATOT	Moyenne (%)	14.54 b	3.52 a	59.14 d	28.06 c	63.97 d
	C.V.	52	92	24	49	24
STOT	Moyenne (%)	41.62 b	86.86 c	6.78 a	33.29 b	5.07 a
	C.V.	40	17	109	51	156
LTOT	Moyenne (%)	43.84 c	9.62 a	34.08 b	38.65 bc	30.96 b
	C.V.	31	132	36	33	86
CEC	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	7.71 b	5.35 a	26.39 d	13.20 c	21.01 d
	C.V.	20	22	6	14	9
PM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	1.74 a	12.80 c	7.01 c	6.92 bc	2.60 ab
	C.V.	105	33	41	33	64
CUM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	2.40 b	1.01 a	3.93 c	2.42 b	4.54 c
	C.V.	23	55	27	34	21
FEM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	163.53 a	181.09 a	207.68 a	220.30 a	209.14 a
	C.V.	5	7	7	6	6
CAM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	4420.46 cd	232.06 a	3050.31 bc	1946.91 b	6367.74 d
	C.V.	12	19	6	6	4
MNM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	73.59 d	7.63 a	32.45 bc	20.39 b	51.35 cd
	C.V.	13	46	19	23	8
KM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	123.84 b	29.39 a	340.72 c	241.02 bc	301.17 c
	C.V.	20	31	15	17	10
MGM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	84.10 a	52.67 a	604.26 c	242.74 b	573.64 c
	C.V.	26	25	10	16	7
NAM3	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	34.30 b	16.43 a	154.62 d	63.69 bc	116.86 cd
	C.V.	21	26	16	17	9
POX	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	184.01 b	102.21 a	468.72 d	263.75 c	488.82 d
	C.V.	7	13	4	6	3
ALOX	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	452.60 a	602.45 a	2271.06 c	1179.68 b	1910.27 bc
	C.V.	10	17	3	5	5
FEOX	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	1359.67 a	1182.04 a	2945.40 b	2385.11 b	2992.91 b
	C.V.	5	16	3	4	4
PHEAU	Moyenne	7.39 c	5.60 a	6.58 b	5.89 a	7.29 c
	C.V.	4	13	8	10	4
PHCA	Moyenne	8.12 c	6.40 a	7.37 b	6.82 a	7.91 c
	C.V.	4	10	7	7	4
CORG	Moyenne (%)	0.09 a	0.07 a	0.27 bc	0.14 ab	0.35 c
	C.V.	51	71	117	40	51
CA	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	14.69 c	1.44 a	12.18 c	6.74 b	23.22 d
	C.V.	14	56	10	27	5
MG	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	1.53 b	0.44 a	7.75 e	2.80 c	5.17 d
	C.V.	43	85	12	33	15
K	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.19 b	0.09 a	0.55 c	0.22 b	0.61 c
	C.V.	51	72	29	45	21
NA	Moyenne (cmol.kg <sup>-1</sup> )	0.17 a	0.08 a	0.74 c	0.19 ab	0.52 bc
	C.V.	63	74	77	46	49
PBR2	Moyenne (mg.kg <sup>-1</sup> )	47.85 a	57.40 ab	134.16 c	96.35 bc	36.34 a
	C.V.	22	14	7	5	16

a-d les moyennes des sous-groupes ayant les mêmes lettres ne diffèrent pas significativement (P=0,05) tel que déterminé par la méthode de comparaison multiple de Tukey

#### 4.3.4.3 Description des regroupements de sols

Pour évaluer l'indice de la capacité de fixation en P des sols, la mesure (ALOX+FEOX) démontre une tendance similaire à l'indice de fixation PSI comparativement à l'indice Selon les trois indicateurs proposés à la figure 4.28 pour évaluer l'indice de la capacité de

fixation en P des sols, la mesure (ALOX+FEOX) démontre une tendance similaire à l'indice de fixation PSI, pour les sous-groupes 2a, 2b et 3, par contre ALM3 est différent. L'indice ALM3 semble surestimer la capacité de fixation des groupes 1b et 2b, principalement composés de sols marqués par le processus de podzolisation à divers degrés et sous-estimer la capacité de fixation des sols argileux riches en carbonates (sous-groupe 1a et 3). La présence de carbonates pourrait réduire l'efficacité de l'extrait Mehlich III. Les sous-groupes 3 et 2a englobent les sols ayant un pouvoir fixateur plus élevé (valeur PSI de 225 et 300). Les sous-groupes 2b contiennent les sols possédant un indice de fixation modéré ( $PSI > 150$ ). Les sols ayant des indices de fixation faibles ( $PSI < 100$ ) sont principalement observés dans le sous-groupe 1a et 1b. Le sous-groupe 1a et 1b ont des mesures comparables avec (ALOX+FEOX).

En ce qui a trait aux figures 4.29 et 4.30, on constate que pour chacun des sous-groupes l'indice de saturation  $[POX/(ALOX+FEOX)]$  est beaucoup plus élevé que l'indice  $[100.PM3/ALM3]$ . Pour les indices  $[POX/(ALOX+FEOX)]$  l'écart est petit entre la valeur moyenne la plus faible (8 %) et la plus élevée (14 %). Les sous-groupes 1a et 3, contiennent les sols riches en carbonates qui ont une teneur en PW faible et des indices de saturation élevés ( $> 12$  %). La teneur en PW la plus élevée (3.5 %) et un indice de saturation modéré ( $\sim 12$  %) sont observés dans le sous-groupe 2a. Les sous-groupes 1b et 2b contiennent des sols avec un PW modéré (2.5 %) et un indice PSATOX plus faible (8 % -10 %). La variation des valeurs en PW semble importante dans chacun des sous-groupes. Dans l'ensemble, les degrés de saturation sont plus élevés que dans les couches supérieures. On constate que les sous-groupes 2a, 2b et 3 malgré leur bonne capacité de fixation du P démontrent des niveaux de saturation élevés. Les sols de nature podzolique (1b) présentent un niveau plus bas de PSATOX, malgré un pouvoir fixateur très faible du substratum. Le sous-sol de ces sols fortement fixateurs a probablement servi de barrière contre le déplacement du P vers le bas du profil.

Le tableau 4.21 a permis de comparer entre elles les moyennes de chacun des groupes. Les 5 sous-groupes peuvent également être décrits sur la base d'autres indicateurs de fertilité. Le groupe 1a contient des sols avec un niveau de fertilité faible (C.E.C.=7.71 cmol kg<sup>-1</sup>), une valeur de PHEAU élevée (7.39) et faible contenu en PBR2 (48 mg kg<sup>-1</sup>). Le sous-groupe 1b contient les sols avec un niveau de fertilité comparable à 1a, un PHEAU faible (5.6) et un contenu faible en PBR2 (pH acide). Le groupe 2a regroupe les sols possédant un niveau de fertilité élevé (C.E.C.=26 cmol kg<sup>-1</sup>), une valeur PHEAU modérée (6.7) et un niveau élevé en PBR2 (134 mg kg<sup>-1</sup>). Le sous-groupe 2b comprend des sols avec un contenu en PBR2 plus faible que 2a, une valeur de pH faible (5.8). Les sols appartenant au groupe 3 ont un niveau de fertilité élevé (C.E.C.=21.01 cmol kg<sup>-1</sup>), un pH élevé (PHEAU=7.29) et un contenu en PBR2 faible (36.34 mg kg<sup>-1</sup>).

### **4.3.5 Analyse discriminante**

Plusieurs analyses discriminantes ont été effectuées afin de différencier les 5 groupes générés par la méthode de groupement hiérarchique à partir de plusieurs sous-ensembles de variables.

#### **4.3.5.1 Analyse discriminante effectuée sur l'ensemble des variables**

Une analyse discriminante par étapes a été effectuée sur l'ensemble des variables. Les variables conservées dans le modèle final étaient PSI, CAM3, PHCA, CEC, PBR2 et ATOT. Le pourcentage de bonnes classifications de la matrice ordinaire et de Jackknife étaient respectivement de 94 % et 92 %. La variable PHCA a un pouvoir de discrimination important dans la différenciation des sous-groupes. C'est le sous-groupe 2a qui obtient le plus faible pourcentage de bonnes classifications, soit 88 %. La distinction entre tous les groupes semble très satisfaisante. Les équations de classification pour chacun des sous-groupes sont présentées au tableau 4.22.

Tableau 4.22: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes provenant de l'ensemble des variables

Variables	Sous-groupes				
	1a	1b	2a	2b	3
Constante	-229.10	-146.51	-256.73	-211.84	-258.92
Ln (PSI)	21.87	18.16	23.86	22.57	23.54
Ln (CAM3)	11.66	7.45	11.08	11.56	11.34
PHCA	25.84	20.08	22.08	19.31	25.59
Ln (CEC)	24.30	20.23	33.57	27.89	32.00
Ln (PBR2)	5.91	7.72	9.04	9.01	4.39
ATOT	-0.50	-0.45	-0.23	-0.40	-0.20

Les deux premières fonctions canoniques discriminantes ont été conservées. La première fonction est surtout expliquée par la capacité d'échange cationique et plus faiblement par le pourcentage d'argile et la capacité de fixation en P (PSI). La deuxième fonction est expliquée par le pH au  $\text{CaCl}_2$  (présence de carbonates) et, à l'opposé, par le contenu en P extrait par Bray II (disponibilité de P fonction du pH élevé ou acide). La variable PHCA importante dans cette fonction semble moins efficace pour discriminer les sous-groupes 2a et 2b, entre autres parce que ces deux groupes contiennent des sols avec des pH très variés comme le démontre leur C.V. élevé (47 % et 55 %).

#### 4.3.5.2 Analyse discriminante effectuée sur les variables modernes

Par la suite, une autre analyse discriminante par étapes a été effectuée sur les variables extraites par Mehlich III, par l'oxalate d'ammonium et deux indicateurs liés à la fixation et la désorption du P, PSI et PW. Le modèle final était composé des variables CAM3, KM3, MGM3, PHCA, ATOT et STOT. Le pourcentage de bonnes classifications de cette sélection de variable était de 91%, pour la matrice ordinaire de classification et 88 % pour la matrice de Jackknife. Les fonctions de classification sont présentées au tableau 4.23.

Tableau 4.23: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes provenant des variables modernes

Variables	Sous-groupes				
	1a	1b	2a	2b	3
Constante	-154.07	-121.27	-142.99	-122.40	-163.38
Ln (CAM3)	8.23	1.93	4.34	4.44	6.63
Ln (KM3+1)	0.34	3.52	4.24	4.94	1.97
Ln (MGM3)	5.04	6.66	9.16	8.55	7.89
PHCA	25.41	20.92	21.19	18.83	23.89
ATOT	0.13	0.23	0.37	0.18	0.43
STOT	0.53	0.83	0.47	0.54	0.47

Les variables ATOT et STOT et, dans une moindre mesure, CAM3 et PHCA ont un pouvoir de discrimination important dans la différenciation des sous-groupes. Le sous-groupe 2a obtient un pourcentage de bonnes classifications le plus faible soit de 85 % (Annexe F). Les sols mal classifiés de ce sous-groupe se sont retrouvés dans les sous-groupes 2b et 3. La distinction entre chacun des sous-groupes semble très acceptable dans l'ensemble. Les deux principales fonctions canoniques discriminantes ont été conservées. La première fonction est principalement expliquée par le pourcentage de sable (la texture). La deuxième fonction est principalement expliquée par le calcium extrait par Mehlich III et, plus faiblement, par le pH au CaCl<sub>2</sub>. Cette fonction est aussi expliquée par le potassium et magnésium extrait par Mehlich III (relié au pourcentage d'argile), situés à l'opposé des variables précédentes. La variable STOT de la première fonction semble moins efficace pour discriminer le sous-groupe 2a de 2b et 3 que ATOT dans le modèle précédent.

#### 4.3.5.3 Analyse discriminante effectuée sur les variables traditionnelles

Pour terminer, une autre analyse discriminante par étapes a été effectuée sur les variables traditionnelles seulement. Le modèle final obtenu était formé des variables PHCA, CA, CEC, PBR2 et ATOT. Les résultats obtenus de bonnes classifications de la matrice ordinaire et de Jackknife étaient respectivement de 92 % et 88 %. Les variables ATOT et CA ont un pouvoir de discrimination important dans la différenciation des sous-groupes.

Les différentes équations de classification pour l'ensemble des sous-groupes sont présentées au tableau 4.24. Les sols du sous-groupe 2b ont obtenu le plus faible pourcentage de bonnes classifications soit 87 %, ce qui est acceptable, par rapport au modèle contenant des indicateurs modernes.

Tableau 4.24: Coefficients des fonctions de classification de chacun des 5 sous-groupes provenant des variables traditionnelles

Variables	Sous-groupes				
	1a	1b	2a	2b	3
Constante	-138.38	-93.63	-155.07	-1116.70	-158.42
PHCA	27.40	22.57	24.15	21.94	26.95
Ln (CA+1)	3.67	-8.11	-1.87	-2.05	2.27
Ln (CEC)	19.42	21.87	31.13	26.00	27.39
Ln (PBR2)	6.18	7.11	8.97	8.73	4.70
Ln (ATOT)	-0.18	-0.19	0.12	-0.07	0.15

Les sols mal classifiés de ce sous-groupe se sont retrouvés dans le groupe 1a et 1b. La distinction entre chacun des sous-groupes semble très acceptable dans l'ensemble. Les deux premières fonctions canoniques discriminantes ont été conservées. La première fonction est expliquée par le pourcentage d'argile. La deuxième fonction est principalement expliquée par le calcium extrait par l'acétate d'ammonium et, plus faiblement, par le pH au CaCl<sub>2</sub>. Les variables CA et PHCA semblent davantage efficaces pour bien discriminer les sols riches en carbonates des autres.

#### 4.3.6 Résumé

Dans l'analyse en composante principale, les deux premières composantes ont été conservées. La première est liée à la texture, aux éléments reliés à la fertilité et pouvoir de fixation du P, la deuxième est liée au pH (contenu en carbonates). À partir de l'analyse de groupement hiérarchique, 5 sous-groupes ont été formés. Le sous-groupe 1a regroupe les séries de sols avec un fort contenu en carbonates (pH=7.4), une texture loameuse, une

séries de sols avec un fort contenu en carbonates ( $\text{pH}=7.4$ ), une texture loameuse, une capacité de fixation plus élevée ( $\text{PSI}=101$ ) que le sous-groupe 1b mais plus faible que les autres et des indices de saturation élevés ( $>14\%$ ). Les séries de sols appartenant au sous-groupe 1b ont une capacité de fixation très faible ( $\text{PSI}=56$ ), appartiennent à l'ordre des podzols, ont une texture sableuse et de loam grossier et leur niveau faible en PBR2. Les séries appartenant au sous-groupe 2a ont une texture argileuse, ne contiennent pas de carbonates, possèdent une forte capacité de fixation ( $\text{PSI}=291$ ) et des indices en PSATOX et un contenu en PBR2 élevés. Le sous-groupe 2b contient les séries de sols qui ont une texture plus loameuse, un pouvoir de fixation ( $\text{PSI}=180$ ) et un niveau de PBR2 plus faible que le sous-groupe 2a. Le groupe 3 contient les sols avec un contenu faible en carbonates, une texture plus argileuse, un pH élevé ( $\text{PHEAU}=7.29$ ) et une bonne capacité de fixation ( $\text{PSI}=228$ ) et un indice de saturation élevé ( $\text{PSATOX} >12\%$ ).

Au niveau du substratum, les facteurs qui sont les plus influents sur la capacité de fixation du P, sont principalement la texture (contenu en argile) mais aussi la présence de carbonates qui diminue la capacité de fixation des sols par son influence sur le pH ( $< 8$ ) et la réactivité des sesquioxydes et calcium avec le P.

Les variables retenues par l'analyse discriminante comme étant les plus efficaces pour discriminer les différents sous-groupes sont: ATOT et PHCA, indicateurs traditionnels et, CAM3 indicateurs modernes. Le modèle établi à partir des indicateurs traditionnels est plus efficace que celui avec les indicateurs modernes. Dans chacun des modèles les variables reliées à la texture et au contenu en carbonates, sont plus discriminantes que les indicateurs reliés directement à la fixation du P (PSI, ALM3, ALOX et FEOX).

#### **4.4 Modèle déductif de classification des sols selon leur capacité de fixation du phosphore**

L'étude des tendances qui se dessinent pour chacune des couches de sol, permet d'élaborer un modèle généralisé simplifié sur la capacité de fixation et de désorption du P. Pour la couche de surface, on observe que les sols possédant une texture loam argileux à argile limoneuse ont une forte capacité de fixation. Viennent par la suite, de très près, les sols ayant une texture de sable à loam limoneux et un sous-sol enrichi en sesquioxydes de fer et d'aluminium provenant de l'incorporation de l'horizon B dans la couche de surface suite au labour. Les sols possédant une texture plus loameuse et un pH élevé (PHEAU=6.8) dû à la présence de calcaire au niveau du substratum ont une capacité de fixation du P moindre. Les sols ayant une texture plus sableuse ont une capacité similaire aux précédents s'il n'y a pas la présence de sesquioxydes de fer et d'aluminium. Les facteurs influençant davantage la mesure de la capacité de fixation sont principalement la texture et par la suite la genèse des sols (sesquioxydes).

Au niveau du sous-sol, les sols les plus fixateurs sont les sols possédant des horizons podzoliques Bf ou des horizons Bfj et Bgf accompagnés de pH acide (PHEAU=5.6). Ils sont suivis de près par les sols riches en argile et n'ayant pas un substratum calcaire. Les sols les moins fixateurs ont une texture loameuse et un substratum fortement ou faiblement calcaire ou une texture sableuse sans enrichissement en sesquioxydes de fer et d'aluminium. La genèse du sol et plus particulièrement la podzolisation a une plus grande influence sur la capacité de fixation en P que la texture du sol au niveau du sous-sol.

Au niveau du substratum, les sols les plus fixateurs en P ont un fort contenu en argile sans présence de calcaire. Viennent par la suite les sols riches en argile avec présence de carbonates. Les sols loameux non enrichis en carbonates ont une capacité de fixation plus élevée que les sols loameux avec présence de carbonates libres (formation de phosphates calciques et magnésiens). Les sols sableux d'origine podzolique ont la plus faible capacité

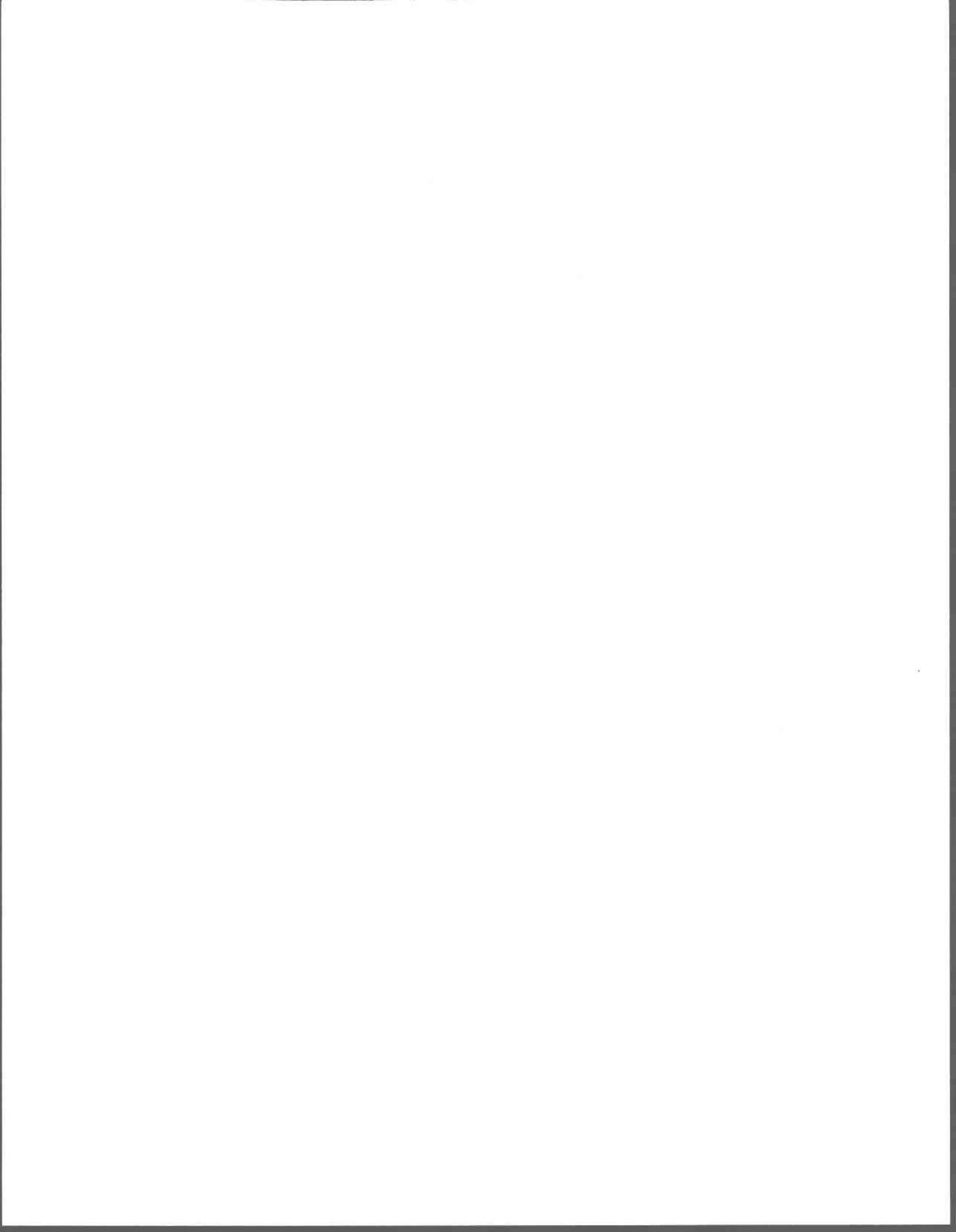
de fixation. Les facteurs influençant davantage la mesure de la capacité de fixation sont principalement la texture du sol et ensuite la réaction du sol relié à la présence de carbonates.

On peut en déduire que la capacité de fixation augmente selon les classes de texture (Tableau 3.6) selon l'ordre décroissant suivant la classe 5, 4, 3, 2 et 1. Cependant, la taxonomie vient modifier cet ordre. Les sols à évolution podzolique ont un pouvoir de fixation plus élevé que les brunisols, suivis des gleysols possédant un horizon B<sub>fj</sub> ou un B<sub>gf</sub> et des gleysols. L'influence de la genèse est évidemment plus marquée au niveau du sous-sol mais elle intervient également au niveau de la couche de surface car le labour a incorporé et incorpore périodiquement une partie du sous-sol et les sesquioxydes de fer et d'aluminium qui s'y trouvent. La présence de carbonates au niveau du substratum influence (par la remontée de la nappe phréatique) le pH dans tout le profil (sous-sol et couche de surface) ainsi que le contenu en sesquioxydes de fer et d'aluminium, la minéralogie et les différentes formes de P du sol. Le risque de désorption du P croît inversement avec l'indicateur PSI et proportionnellement avec le pH du sol. Les mesures de pH observées dans la couche de surface (PHEAU=4 à 8) et dans le sous-sol (PHEAU=5 à 8) sont inférieure à 8.

On observe que le comportement de chacun des horizons de sol est influencé avec plus ou moins d'intensité par les autres horizons du profil de sol. Un sol podzolique ayant un substratum sableux pourra être sujet à la désorption malgré sa forte capacité de fixation des horizons supérieurs. Les sols à texture argileuse et ayant un substratum calcaire sont sensibles à la désorption du P principalement dans les horizons inférieurs, malgré leur forte capacité de fixation.

Pour interpréter la dynamique de fixation du P dans le sol, on doit donc intégrer le transit du P à travers la couche de surface, le sous-sol et le substratum et estimer la contribution potentielle des ces différentes couches dans la sorption et désorption du P. La couche de

surface devrait avoir la plus forte contribution dans le modèle de classification, puisque la grande majorité des pertes en P ont lieu à cet endroit par érosion [Sharpley et Halvorson, 1994] ou par ruissellement de surface [Stamm et *al.*, 1998] et que le P est relativement peu mobile dans le sol comparativement à beaucoup d'autres éléments. De plus, la couche de surface est le site à l'origine du phénomène de désorption du P associé à la saturation des horizons de surface à cause de l'utilisation à long terme d'engrais phosphatés contribuant à diminuer progressivement la capacité de fixation du P et à augmenter le risque de migration du P vers le bas du profil [Heckrath et *al.*, 1995; Beauchemin et *al.*, 1996 et 1998]. Les sols argileux se sont montrés vulnérables à ce type de contamination en raison des possibilités d'écoulement préférentiel par les fentes de retraits en saison sèche ou par les biopores. C'est un phénomène physique où la capacité de fixation ou le degré de saturation en P n'interviennent pas dans la mobilité du P dans le profil de sol. La région à l'étude est affectée par ce phénomène puisque la majorité des sols sont argileux et gleysoliques. Le sous-sol, siège de l'activité génétique au niveau du profil, occupe la seconde place pour sa contribution dans le modèle, puisque les sols possédant une forte proportion de sesquioxydes de fer et d'aluminium, influencent la capacité de fixation de la couche de surface et permettent de ralentir le mouvement vertical du P vers les couches inférieures. Le substratum a une plus faible contribution au modèle. Il exerce cependant une influence sur l'augmentation de l'intensité de la désorption du P des couches supérieures vers les couches inférieures à cause de la présence d'un substratum calcaire, qui agit sur la solubilité du P et la diminution de la capacité des sesquioxydes de fer et d'aluminium et le calcium à fixer le P, particulièrement à des pH inférieur à 8.



## 5. CONCLUSION

---

Le but principal de notre recherche était de générer un modèle de classification des sols du sud-est de la plaine de Montréal en utilisant les propriétés physico-chimiques et les propriétés reliées à la capacité de fixation et de désorption du P. Notre modèle de classification ne prend pas en compte les caractéristiques physiques telles que la perméabilité du sol, la conductivité hydraulique, la structure du sol et la capacité de rétention en eau; seule la granulométrie des sols a été utilisée comme indicateur. Les regroupements de sols obtenus ont permis de constater que la capacité de fixation variait en fonction de plusieurs caractéristiques de sols telles que le contenu en sesquioxydes de fer et d'aluminium, la texture, la réaction du sol et le contenu en matière organique. L'analyse en composantes principales, une des techniques statistiques utilisées pour élaborer le modèle de classification, a démontré que la texture du sol et les éléments liés au degré de fertilité avaient une grande importance pour effectuer la distinction entre les différents sols de la région. Les autres indicateurs importants étaient l'indice de fixation PSI, le contenu en fer et en aluminium extrait par l'oxalate d'ammonium. Le groupement hiérarchique a permis dans l'ensemble de bien séparer les sols selon leur capacité à retenir le phosphore ou leur sensibilité à la désorption en P. La distinction entre les groupes semblait plus nette dans le substratum que dans la couche de surface. Dans la couche de surface, les propriétés de sols comme la texture, le pH et la présence de sesquioxydes de fer et d'aluminium ont permis de bien décrire la particularité de chacun des groupes de sols. Dans le sous-sol, le contenu en sesquioxydes de fer et d'aluminium et la texture du sol ont eu une grande importance dans la distinction des sols. Dans le substratum, la présence de carbonates et la texture ont servi à bien distinguer chacun des groupes de sol. L'analyse discriminante effectuée sur chacune des couches de sol va permettre de classer les autres sols de la région à l'étude. La démarche à suivre pour le classement des types de sol provenant de l'inventaire, relié à la cartographie pédologique de la région, en n'utilisant que les indicateurs traditionnels, est

présenté à l'Annexe G. Le système de classification de la couche de surface a permis le reclassement des sols avec un pourcentage de bonnes classifications de 82 à 74 %. Le pourcentage de bonnes classifications était généralement plus élevé dans les couches inférieures de sol. L'analyse discriminante effectuée sur les variables traditionnelles et modernes de la couche de surface a démontré que les variables relatives à la texture, au pH et au contenu en aluminium ou calcium sont les plus discriminantes. La classification réalisée avec les indicateurs traditionnels, notamment le contenu en P extrait au Bray-2, a permis aussi une bonne discrimination entre les groupes dans la couche de surface et le substratum. Le pourcentage de discrimination était légèrement supérieur avec les modèles fonctionnant avec les indicateurs modernes, par contre le modèle avec les indicateurs traditionnels utilise moins de variables.

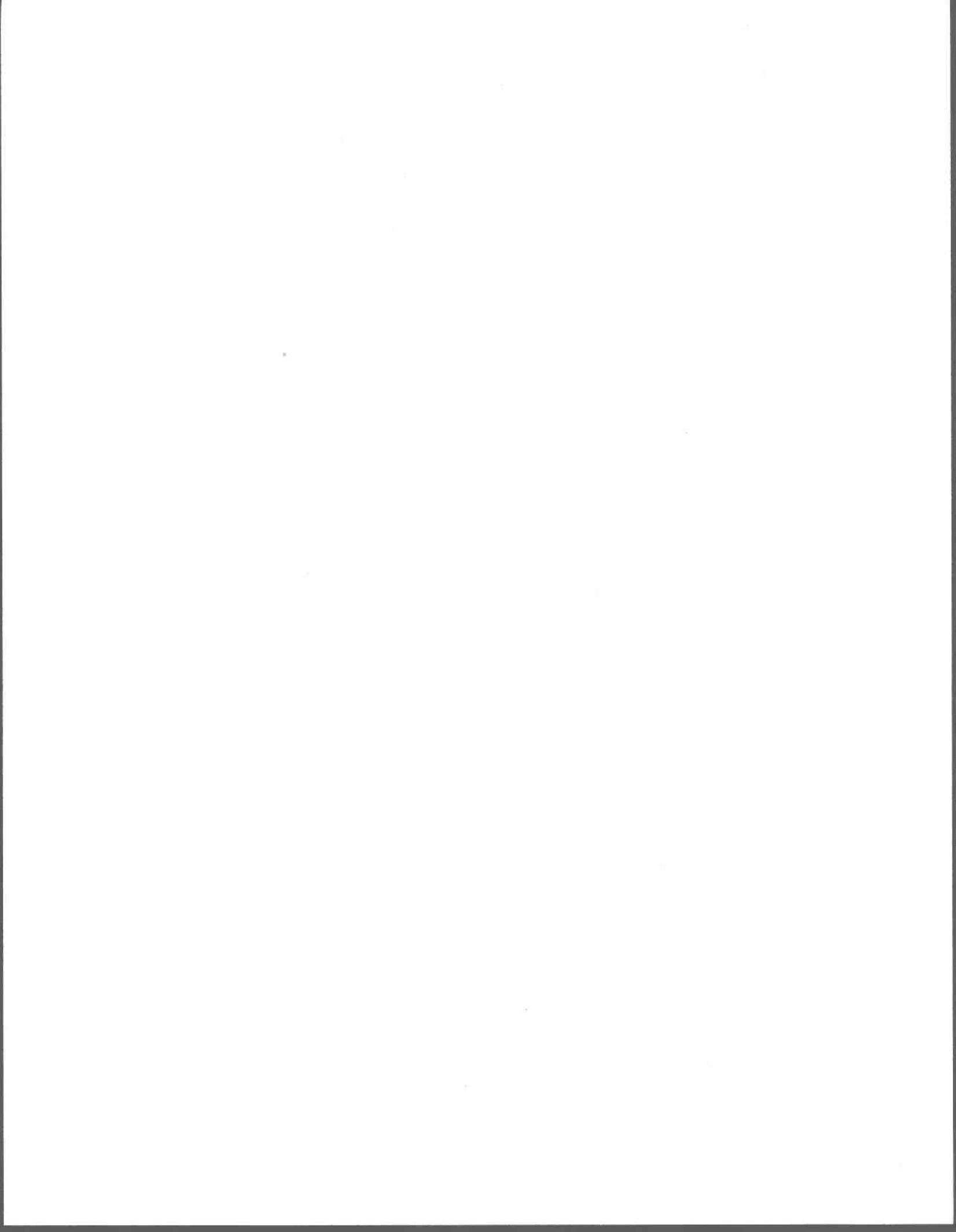
Par la suite, un modèle plus simplifié a été dégagé pour séparer les sols selon leur capacité de fixation ou leur vulnérabilité à la désorption du P. Selon les résultats des figures 4.4, 4.6, 4.7 et 4.11, les argiles gleysoliques se classent parmi les sols les plus fixateurs de P et se comparent en termes de capacité de fixation de P aux sols podzoliques souvent considérés comme très fixateur de P. On a noté le rôle accru de la genèse (podzol > brunisol > gleysol) sur la capacité de fixation du P au niveau du sous-sol et l'effet de la présence de calcaire (et de réaction) au niveau du substratum sur la désorption et disponibilité du P. Ainsi, il apparaît que la présence de carbonates dans le substratum favorise une réaction s'approchant de la neutralité dans la couche de surface, ce qui entraîne une capacité moindre de fixation du P et une plus grande tendance à la désorption. Cependant, au niveau du substratum, où l'action des carbonates est plus directe, cette présence se traduit au contraire par une plus faible tendance à la désorption et à la disponibilité du phosphore, malgré des niveaux de saturation élevés en P, par rapport au comportement des sols non calcaires de même texture.

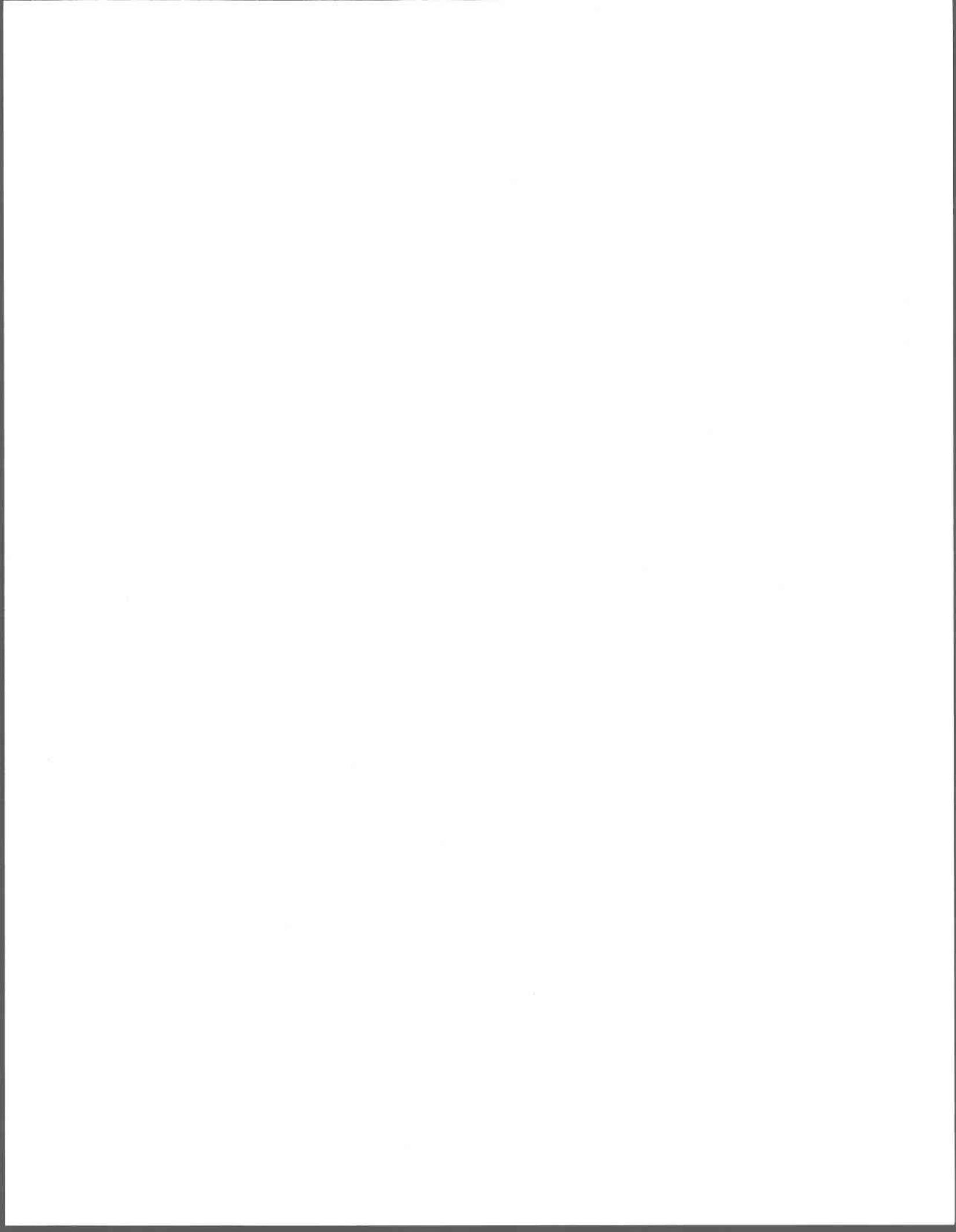
Les sols du Québec ont des propriétés physico-chimiques très variées selon les différents processus de formation qui y sont actifs et de leur matériel originel respectif. C'est

particulièrement le cas de leur teneur en P et de leur capacité de fixation en P. La région de la plaine de Montréal est constituée principalement par des sols argileux de type gleysolique et contenant surtout des formes de phosphates calciques et magnésiens (matériel parental). Ces sols ont des teneurs en ALOX+FEOX semblable à celle du groupe de sols podzoliques étudiés dans cette région (Fig. 4.11). Ils ont pour la plupart une capacité de fixation plus faible que celle observée dans les sols podzoliques des régions laurentienne et appalachienne, dans lesquels la chimie du P est fortement influencée par la présence de fer et d'aluminium en quantité abondante [Giroux et *al.*, 1996]. Selon les catégories de capacité de fixation établies dans la grille de fertilisation présentée au tableau 2.1, la moyenne du contenu en ALM3 de la couche de surface des sols de la région à l'étude étant de  $953 \text{ mg.kg}^{-1}$ , on peut donc classer le potentiel de fixation du P de cette région comme faible. On sert de l'indicatif ALM3 pour dire que le potentiel de fixation est faible alors que ALOX+FEOX et PSI montrent selon nos résultats que les sols argileux (groupe 4) ont des niveaux plus élevés que les sols podzolique (groupe 2 et 5). Est-ce que l'indicateur ALM3 est un indice efficace pour exprimer la fixation en P. La moyenne de PM3, retrouvée dans la couche de surface de la région à l'étude, est de  $105 \text{ kg ha}^{-1}$  (tableau 3.12) avec des valeurs variant de 1 à  $725 \text{ kg ha}^{-1}$ , qui, selon la même grille, sont définis comme étant de fertilité moyenne à excessivement riche selon les besoins des grandes cultures (maïs, céréales et soya) [C.P.V.Q., 1996]. Les résultats de classification obtenus permettent de confirmer qu'un seul critère (la texture) utilisé dans les grilles de fertilisation actuelle, ne permet pas de bien caractériser chaque sol selon sa capacité de fixation en P. Ces grilles font l'équivalence (i) argile=gleysol=faible capacité de fixation en P versus (ii) sable=podzol=forte capacité de fixation. Selon cette règle si on considère nos résultats pour la couche de surface, on devrait classer les sols plus sableux comme étant les plus fixateurs et les argiles dans les moins fixateurs. Certains sols de cette région ont passé pour la plupart l'étape de redressement, c'est à dire lorsque le sol atteint un niveau riche en P disponible, la fertilisation avec des engrais de ferme doit être absolument ajustée de façon à réduire l'enrichissement du sol (Côté et *al.*, 1999). La région a été comparée avec les analyses de sols, provenant d'une région à forte densité animale, du bassin de la rivière

Beaurivage [Simard et *al.*, 1994]. On constate que la moyenne des valeurs de PSI dans la couche de surface est de 433 pour les sols caractérisant cette région, par rapport à 258 (Tableau 3.12) pour la région à l'étude. Il faut savoir que les valeurs de PSI observées, dans l'étude de Simard et *al.* (1994), n'ont pas été obtenues dans les mêmes conditions au laboratoire (temps de contact plus long, ratio sol/solution différent) que les valeurs de cette étude, ce qui peut contribuer à la différence entre les deux mesures. Pour la région à l'étude, la moyenne du niveau de saturation en P (PSATOX) de la couche de surface est de 8 % avec des valeurs variant de 0.58 à 47 (Tableau 3.12). Étant donné que l'ensemble des sols de la région à l'étude ont une capacité de fixation plus faible, on peut estimer que le risque de pollution des eaux de surface en P sera plus grand. La majorité des sols de cette région ont un système de drains souterrains qui peut contribuer à accentuer le mouvement vertical du P puisque l'infiltration de l'eau et la percolation sont augmentées. De plus, il y a possibilité d'écoulement préférentiel des eaux de drainage suite à la dessiccation et au fendillement des sols plus argileux de cette région, puisque la majorité des sols sont principalement formés d'argile de type vermiculite et ont généralement de faibles pentes [Simard et *al.*, 1991]. Selon les statistiques agricoles (section 3.1.2) de la région à l'étude, les M.R.C. de Rouville et Maskoutains seraient vulnérables à la pollution des cours d'eau par le P, puisqu'il y a une plus forte production animale et, par conséquent, davantage de terres recevant de l'engrais organique. De plus, dans la M.R.C. de Maskoutains et dans celle du Bas-Richelieu, plus de 40 % du territoire agricole est occupé par la culture de maïs-grain, contribuant à une utilisation massive d'engrais minéraux phosphatés [Tabi et *al.*, 1990] augmentant ainsi les risques de pollution par le P des rivières Yamaska et Richelieu.

Dans l'ensemble, les résultats de cette étude ont indiqué que les propriétés physico-chimiques des sols peuvent être efficacement utilisées conjointement avec les indicateurs de capacité de fixation et de désorption du P pour identifier les sols vulnérables quant à la pollution des eaux de surface.





## 6. BIBLIOGRAPHIE

---

- Bache, B.W. et E.G. Williams (1971). A phosphate sorption index for soils. *J. Soil Sci.*, 22: 289-301.
- Ballard, R. et J.G.A Fiskell (1974). Phosphorus retention in Coastal Plain forest soils: Relationship to soil properties. *Soil Sci. Am. Proc.*, 38: 250-255.
- Baril, R.W. (1986). Historique de la pédologie, de la classification et de la cartographie des sols au Québec. Dans: *Actes du colloque sur la rétrospective de la recherche sur les sols au Québec*, (Cahier de l'ACFAS no.37), M.C. Nolin (éd.), pp.3-24. Chicoutimi, Québec.
- Baril, R. et A. Mailloux (1942)a. *Carte des sols du comté de Saint-Hyacinthe*. Service de la Grande Culture, Ministère de l'Agriculture, 1 carte + 1 notice explicative.
- Baril, R. et A. Mailloux (1942)b. *Carte des sols du comté de Chambly*. Service de la Grande Culture, Ministère de l'Agriculture, 1 carte + 1 notice explicative.
- Baril, P., C. Bernard, J. Caron, C. Émond et A. Michaud (1996). Approche par bilan et par bassin versant. Dans: *Colloque sur la fertilisation intégrée des sols*, C.P.V.Q. (éd.), pp.177-199. Drummondville (Qc), 24 janvier. Gouvernement du Québec
- Beauchemin, S. et R.R Simard (1999). Phosphorus saturation indices: review of some indices and their suitability for P management in Québec, Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 79 (sous presse).
- Beauchemin, S., R.R. Simard et D. Cluis (1998). Forms and concentration of phosphorus in drainage water of twenty-seven tile-drained soils. *J. Environ. Qual.*, 27: 721-728.
- Beauchemin, S., R.R. Simard et D. Cluis (1996). Phosphorus sorption-desorption kinetics of soil under contrasting land uses. *J. Environ. Qual.*, 25: 1317-1325.
- Behrendt., H et A. Boekhold (1993). Phosphorus saturation in soils and groundwater. *Land Degradation and Rehabilitation*, 4: 233-243
- Bernard, C (1991). La conservation du sol et de l'eau à l'échelle du bassin versant. *Agrosol*, 4 (1): 39-44.
- Bernier, D., C. Émond et M. Giroux (1996). Utilisation rationnelle du phosphore en agriculture: Problématique environnementale associée à l'enrichissement des sols en phosphore. Dans: *Colloque sur la fertilisation intégrée des sols*, C.P.V.Q. (éd.), pp.76-83. Drummondville, 24 janvier. Gouvernement du Québec.
- Bidwell, O.W. et F.D. Hole (1964). Numerical taxonomy of soil classification. *Soil Sci.*, 97: 58-62.
- Bockman, O.C., O. Kaarstad, O.H. Lie et I. Richards (1990). *Agriculture et fertilisation: Les engrais - leur avenir*. Oslo (Norvège), Norsk Hydro, Division agriculture, 258 p.
- Bolinder, M., R.R. Simard, S. Beauchemin et K.B. Macdonald (1998). *Indicator of risk of water contamination: Methodology for the phosphorus component*. Rapport No. 24. Ottawa (Ont.), Agriculture et Alimentation Canada. 31 p.
- Bouchard, S., C. Emond, G. Gangbazo, P. Vallée et M. Vallières (1987). *La problématique de la gestion environnementale du lisier de porc*. 70<sup>e</sup> Congrès canadien de génie chimique, Université Laval, Sainte-Foy (Qc), 35 p.

- Bowman, R.A., S.R. Olsen et F.S. Watanabe (1978). Green-house evaluation of residual phosphate by four phosphorus methods in neutral and calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 451-454.
- Brar, S.P.S. et F.R. Cox (1991). Phosphorus sorption and availability indices as affected by properties of calcareous soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 22: 1225-1241.
- Breeuwsma, A., et J.G.A. Reijerink (1992). Phosphate-saturated soils: A "new" environmental issue. Dans: *Proc. Of the European conference: Chemical time bombs*, G.R.B. ter Meulen, W.M. Stigliani, W. Salomons, E.M. Bridges et A.C. Imeson (Eds), pp. 79-85. Veldhoven (Pays-Bas), 2-5 sept. Published by the foundation for Ecodevelopment.
- Breeuwsma, A. et S. Silva (1992). *Phosphorus fertilisation and environmental effects in the Netherlands and the Po region (Italy)*. Rapport 57. Wageningen (Pays-Bas), DLO The Winand Staring Center, 39 p.
- Breeuwsma, A., J.G.A. Reijerink et O.F. Schoumans (1995). Impact of manure on accumulation and leaching of phosphate in areas of intensive livestock farming. Dans: *Animal waste and the land-water interface*, K. Steele (éd.), pp. 239-251. New-York: Lewis publishers.
- Cattell, R.B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, 1: 245-276.
- Carter, M.R. (1993). *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton, Lewis publishers, 823 p.
- Choinière, L., E. Pageau et A. Mailloux (1942). Carte des sols du comté de Rouville. Service de la grande culture. Ministère de l'agriculture. 1 carte + 1 notice explicative.
- Clark, R.B. (1989). *Marine pollution*. 2 éd. Oxford (G-B), Clarendon Press.
- Cogger, C. et J.M. Duxbury (1984). Factors affecting phosphorus losses from cultivated organic soils. *J. Environ. Qual.*, 13:111-114.
- Comité d'experts sur la prospection pédologique d'Agriculture Canada (1987). *Le Système canadien de classification des sols*. Seconde édition. Agriculture Canada, Publication 1646, 170 p.
- Conseil des Productions Végétales du Québec (1996). *Grilles de référence en fertilisation*. 2ème édition. Agdex 540, Québec. 128 p.
- Conseil des Productions Végétales du Québec (1994). *Grilles de référence en fertilisation*. 4ème édition. Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (éd.), Agdex 540, 91 p.
- Cope, J.T., C.E. Evans et H.C. Williams (1981). Soil test fertilizer recommendations for Alabama crops. Alabama Agric. Exp. Stn. Circ. 251.
- Côté, D., T.S. Tran et A. N'dayegamiye (1999). Gestion des engrais de ferme en relation avec le P du sol. Dans: *Journée d'information sur la problématique environnementale du phosphore*, IRDA et FSAA (Eds), p. 4. Ste-Foy (Québec), 26 mars. Université Laval.
- Cuanalo, H.E. et R. Webster (1970). A comparative study of numerical classification and ordination of soils properties in a locality near Oxford. *J. Soil Sci.*, 21: 340-352.
- Culley, J.L.B., E.F. Bolton et V. Bernyk (1983). Suspended solids and phosphorus loads from a clay soil: Plot studies. *J. Environ. Qual.*, 12: 493-498.

- Dalal, R.C. et E.G. Hallsworth (1976). Evaluation of the parameters of soil phosphorus availability factors in predicting yield response and phosphorus uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40: 541-546.
- De Kimpe, C.R. et M.R. Laverdière (1980). Effet du drainage souterrain sur quelques propriétés de sols argileux du Québec. *Can. J. Soil Sci.*, 60: 83-96.
- Deslisle, F. (1997). Bassin-versant de la rivière l'Assomption: l'activité agricole et ses effets sur la qualité de l'eau. Québec, Ministère de l'Environnement et de la Faune (éd.), 110 p.
- De Smet, J., G. Hofman, J. Vanderdeelen, M. Van Meivenne et L. Baert. 1996. Phosphate enrichment in the sandy loam soils of West-Flanders, Belgium. *Fertilizer Research* 43 :209-215.
- Dillon, W.R et M. Goldstein (1984). *Multivariate analysis: methods and applications*. New-York, John Wiley & Sons, 587 p.
- Dubé, P.A. et J.E Chevette (1981). *Atlas agroclimatique du Québec méridional: dérivées de la température*. Rédigé avec la collaboration de Paul Lamb du Service de la météorologie du Québec. Québec, C.P.V.Q., MAPAQ, Agdex 070, 2p. 16 cartes.
- Evans, I.J. et G.W. Smillie (1976). Extractable iron and aluminium and their relationship to phosphate retention in Irish soils. *J. Agric. Res.*, 15: 65-73.
- Gangbazo, G., A.R. Pesant, D. Côté, G.M. Barnett et D. Cluis (1997). Spring runoff and drainage N and P losses from hog-manured corn. *J. Am. Water Res. Asso.*, 33 (2): 405-411.
- Gartley, K.I., et J.T. Sims (1994). Phosphorus soil testing: Environmental uses and implications. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25: 1565-1582.
- Giroux, M. et T.S Tran (1996). Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation en phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrosol*, 9 (2):51-57.
- Giroux, M. et T.S. Tran (1994). Études des facteurs affectant l'évolution des teneurs en P et K des sols agricoles. *Agrosol*, 7 (2):23-30.
- Giroux, M. et T.S. Tran (1985). Évaluation du phosphore assimilable des sols acides avec différentes méthodes d'extraction en relation avec le rendement de l'avoine et les propriétés des sols. *Can. J. Soil Sci.*, 65: 47-60.
- Giroux, M., D. Carrier et P. Beaudet (1996). Problématique et méthode de gestion des charges de phosphore appliquées aux sols agricoles en provenance des engrais de ferme. *Agrosol*, 9 (1): 36-45.
- Gouvernement du Québec (1997). Lois et règlements (Partie 2): Loi sur la qualité de l'environnement (L.R.Q., c. Q-2), réduction de la pollution d'origine agricole. *Gazette Officielle du Québec*, 129<sup>e</sup> année, 18 juin, n° 24, pp. 3483-3509.
- Grenon, L., J.M. Cossette, M. Deschênes et L. Lamontagne (1999). *Étude pédologique de comté de Rouville, Québec*. Sainte-Foy (Québec), Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures Agriculture Canada. 263 p.
- Hartikainen, H. (1991). Potential mobility of accumulated phosphorus in soils as estimated by the indices of Q/I plots and by extractant. *Soil Sci.*, 152: 204-209.
- Hartmann, M.O., D.W.W.Q. Smith et J.J.N. Lampbrechts (1976). The use of a multivariate statistical technique for classification of soils at the series level. *Agrochimophysics*, 8 (1): 1-4.

- Heckrath, G., P.C. Brookes, P.R. Poulton et K.W.T. Goulding (1995). Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *J. Environ. Qual.*, 24: 904-910.
- Hendershot, W.H., H. Lalonde et M. Duquette (1993). Soil reaction and exchangeable acidity. Dans: Soil sampling and methods of analysis, M.R. Carter (éd.), pp. 141-146. Boca Raton, Lewis publishers.
- Humphreys, F.R. et W.L. Pritchett (1971). Phosphorus adsorption and movement in some sandy forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 495-500.
- Jambu, M. (1976). Sur l'application mutuelle d'une classification hiérarchique et d'une analyse des correspondances. *Revue de statistiques appliquées*, 24: 45-73.
- James, F.C et C.E. McCulloch (1990). Multivariate analysis in ecology and systematics: panacea or Pandora's box ? *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 21: 129-166
- Johnson, R.A. et D.W. Wichern (1992). *Applied multivariate statistical analysis*. New Jersey, Englewood Cliffs, Prentice-Hall.
- Kaiser, H.F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23: 187-200.
- Kingery, W.L., C.W. Wood, D.P. Delaney, J.C. Williams et G.L. Mullins (1994). Impact of longterm land application of broiler litter on environmentally related soil properties. *J. Environ. Qual.*, 23: 139-147.
- Kyuma, K. et K. Kawaguchi (1973). A method of fertility evaluation for paddy soils: I. First approximation: chemical potentiality grading. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 19: 1-19.
- Laforge, H. (1973). *Techniques d'analyse numérique de variances multiples*. Québec, Université Laval.
- Lamontagne, L. (1991). *Étude pédologique du comté de Saint-Hyacinthe (Québec)*. Vol. 1 Description et interprétation des unités cartographiques. Vol.2 Description et classification des séries de sols. CRT contrib. No 88-25. Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, 267 p. et 110 p.
- Lamontagne, L. et J.-M. Cossette (1994). *Guide de terrain pour l'excursion sur les sols vertiques dans l'est du Canada (section Québec)*, 23-25 sept. 1994. Contribution C.R.T.R.B. no.94-99. Ste-Foy(Qc), Agriculture et Agro-Alimentaire Canada, 40 p.
- Lamontagne, L. et M.C. Nolin (1997). *Cadre pédologique de référence pour la corrélation des sols*. Ste-Foy (Qc), Équipe pédologique du Québec, Centre de recherches et de développement sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 69 p.
- Lamontagne, L. et M.C. Nolin (1990). *Étude pédologique du comté de Verchères (Québec)*. Vol.1 Description et interprétation des unités cartographiques. Vol. 2 Description et classification des séries de sols. CRT Contrib. 87-92. Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, 319 p. et 130 p.
- Laperrière, L. (1990). *Impact des périodes d'épandage du lisier de porcs sur la qualité des eaux de drainage souterrain*. Rapport final. Drummondville, Groupe H.B.A., 63 p.
- Laplante, L., A. Alarie et A. Mailloux (1942). *Carte des sols du comté de Richelieu*. Service de la Grande Culture, Ministère de l'Agriculture, 1 carte + 1 notice Explicative.
- Legendre, L. et P. Legendre (1979). *Écologie numérique, tome 1: Le traitement multiple des données écologiques*. Paris, Masson et Presses de l'Université du Québec, 197 p.

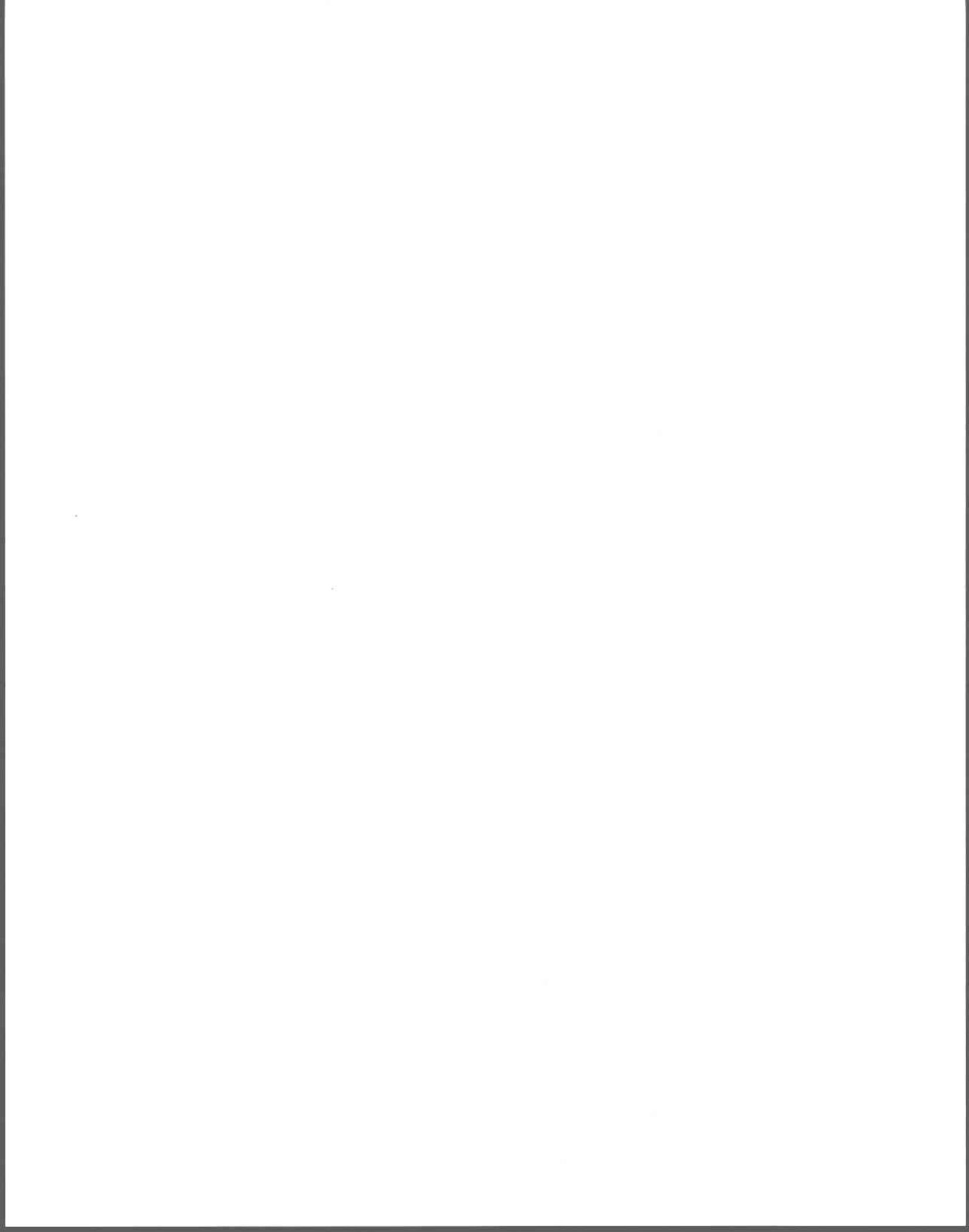
- Lindsay, W.L.(1979). *Chemical equilibria in soils*. Toronto, JohnWiley & Sons.449 p.
- Lookman, R., K. Jansen, R. Merckx et K. Vlassak (1996). Relationship between soil properties and phosphate saturation parameters : a transect study in northern Belgium. *Geoderma*, 69: 265-274.
- Lookman, R., N. Vandeweert, R. Merckx et K. Vlassak (1995). Geostatistical assessment of the regional distribution of phosphate sorption capacity parameters (Feox and Alox) in northern Belgium. *Geoderma*, 66: 285-296.
- Loveland, P.J., P.S Wright et R.J.W. Dight (1983). Relationships between a P-sorption index, extractable Fe and Al and fluoride reactivity in the soils of an area of mid-Wales. *J. Agric. Sci.*, 101: 213-221.
- Mackenthun, K.M (1965). *Nitrogen and phosphorus in water: an annotated selected biography of theirs effects*. Washington (U.S.), Dep. of Health, Education and Welfare, Public Health Service, Div. of Water Supply and Pollution Control, U.S Gov. Print.
- Mansell, R.S., S.A. Bloom et B. Burgoa (1991). Phosphorus transport with water flow in acid, sandy soils. Dans: *Transport processes in porous media*, B. Jacob et M. Y. Corapcioglu (Eds.), pp. 271-314. Dorecht (Pays-bas): Kluwer Academic Publ.
- Martin, A. et M.C. Nolin (1991). *Étude pédologique du comté de Chambly (Québec)*. Vol. 1 Description et interprétation des unités cartographiques. Vol. 2 Description et classification des séries de sols. CRT Contrib. No 89-26. Direction générale de la recherche , Agriculture Canada, 356 p. et 142 p.
- McBride, M. (1994). *Environmental chemistry of soils*. New York, Oxford University Press.
- McCallister, D.L., C.A. Shapiro, W.R. Raun, F.N. Anderson, G.W. Rehm, O.P. Engelstad, M.P. Russelle et R.A. Olson (1987). Rate of phosphorus and potassium buildup/decline with fertilization for corn and wheat on Nebraska mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 1646-1652.
- McCollum, R.E., 1991. Buildup and decline in soil phosphorus: 30 years trend on a Typic Umbraquult. *Agron. J.*, 83: 77-85.
- Mehadi, A.A. et R.W. Taylor (1988). Phosphate adsorption by two highly-weathered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 627-632.
- Miller, R. (1985). Multiple comparaisons. Dans: *Encyclopedia of statistical sciences*, vol. 5, S. Kotz et N.L. Johnson (Eds), pp.679-689. New York: John Wiley & Sons.
- Ministère de l'Environnement du Québec (MEF) (1993). *Critères de qualité de l'eau*. Service d'évaluation des rejets toxiques et Direction de la qualité des cours d'eau. Gouvernement du Québec, 425 p.
- Ministère de l'Environnement et de la Faune (1997a). *Le règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole en bref*. Québec, Gouvernement du Québec, 31p.
- Ministère de l'Environnement et de la Faune du (1997b). *Bassin versant de la rivière Chaudière : modifier nos pratiques agricoles-la priorité*. Québec, gouvernement du Québec, 8 p.
- Ministère de l'Environnement et de la Faune (MEF) (1995). *Qualité de l'eau en milieu agricole: la culture du maïs et les pesticides*. Québec, Gouvernement du Québec, 8 p.

- Mokwunye, U. (1975). The influence of pH on the adsorption of phosphate by soils from Guinea and Sudan savannah zones of Nigeria. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39:1100-1102.
- Mozaffari, M. et J.T. Sims (1994). Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture. *Soil Sci.*, 157: 97-107.
- Muir, J.W., H.G.M. Hardie, R.H.E. Inkson et A.J.B. Anderson (1970). The classification of soil profiles by traditional and numerical methods. *Geoderma*, 4:81-90.
- Mulcahy, M.J. et A.W. Humphries (1967). Soil classification, soil surveys and land use. *Soil and Fertilizers.*, 30 (1): 1-8.
- Nair, V.D., D.A. Graetz et K.R. Reddy (1998). Dairy manure influences on phosphorus retention capacity of spodosols. *J. Environ. Qual.*, 27: 522-527.
- Nault, J. et J. Guilbault (1985). *Répertoire des méthodes d'analyse de sols et des fumiers*. Québec, C.P.V.Q, Agdex 533, 82 pp.
- Nolin, M.C. (1982). *Utilisation des techniques de l'analyse multivariée à la classification de deux séries de sols développées sur till remanié: les séries St-Sylvère et Dosquet*. Thèse de maîtrise. Ste-Foy (Qc), Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation. Université Laval, 283 p.
- Nolin, M.C. et L. Lamontagne (1990). *Étude pédologique du comté de Richelieu (Québec)*. Vol. 1 Description et interprétation des unités cartographiques. Vol 2. Description et classification des séries de sols. CRT Contrib. No 87-74. Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, 287 p. et 115 p.
- Nolin, M.C, L. Lamontagne et A. Martin (1991). Esquisse géopédologique du sud-est de la plaine de Montréal. *Agrosol*, IV(2): 44-57
- Nolin, M.C., C. Wang et M.J. Caillier (1989). Fertility grouping of Montreal Lowlands soil mapping units based on selected soil characteristics of the plow layer. *Can. J. Soil Sci.*, 69: 525-541.
- Norris, J.M. (1971). Singular matrices in multiple discriminant analysis and classification procedures. *Pedo-Biologia*, 11: 410-416.
- Painchaud, J. (1997). Qualité de l'eau: Tendances de la qualité de l'eau des rivières du Québec, 1979-1994. *Vecteur Environnement*, 30(2): 43-50.
- Peck, T.R., L.T. Kurtz et H.L.S. Tandon (1971). Changes in Bray P-1 soil phosphorus test values resulting from applications of phosphorus fertilizer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 35: 595-598.
- Peters, R.H. (1981). Phosphorus availability in Lake Memphremagog and its tributaries. *Limnol. Oceanogr.*, 26:1150-1161.
- Primeau, S. et Y. Grimard (1992). *Qualité des eaux du bassin de la rivière Saint-François, 1976 à 1991*. Sainte-Foy (Qc), Ministère de l'Environnement du Québec, 145 p.
- Primeau, S., et Y. Grimard (1989). *Rivière Yamaska: 1975-1988. Volume 1: Description du bassin versant et qualité du milieu aquatique. Volume 2: Résultats complémentaires sur la qualité des eaux*. Sainte-Foy (Qc), Ministère de l'Environnement du Québec, 136 p. et 150 p.
- Quiroga, A.R., D.E. Buschiazzi, N. Peinemann (1998). Management discriminant properties in semiarid soils. *Soil Sci.*, 163(7): 591-597.
- Robitaille, P. (1994). *Qualité des eaux du bassin de la rivière Nicolet, 1972 à 1992*. Ste-Foy (Qc), Ministère de l'Environnement du Québec, 72 p.

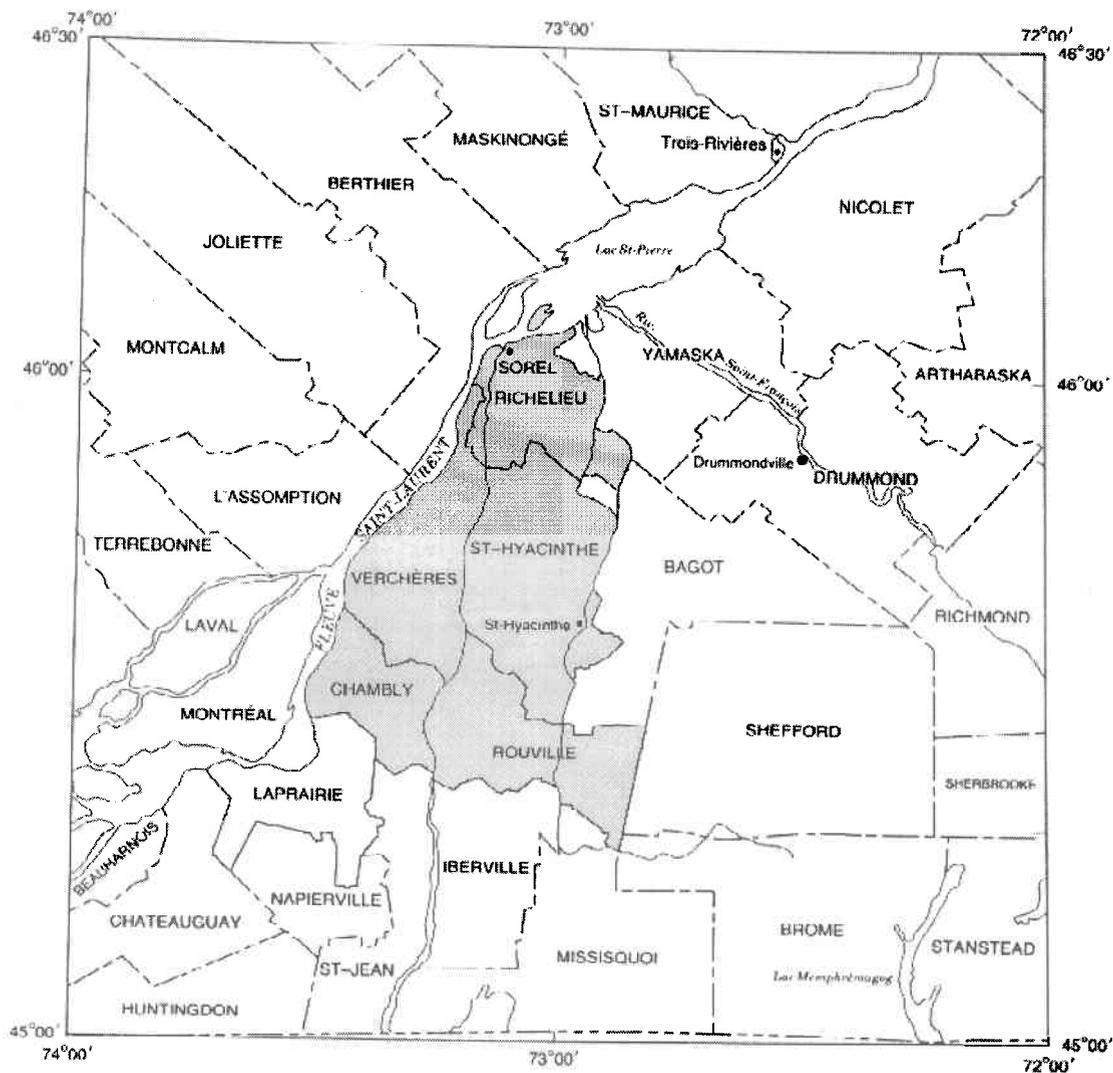
- Ross, G.J. et Wang (1993). Extractable Al, Fe, Mn et Si. Dans: *Soil sampling and methods of analysis*, M.R. Carter (éd.), pp.239-246. Boca Raton, Lewis publishers.
- Ryden, J.C., J.K. Syers et R.F. Harris (1973). Phosphorus in runoff and streams. *Adv. Agron.*, 25: 1-45.
- Saunders, W.M.H. (1965). Phosphate retention by New Zealand soils and its relationship to free sesquioxides, organic matter, and other soil properties. *New Zea. J. Agr. Res.*, 8: 30-57.
- Schoumans, O.F., A. Breeuwsma et W. De Vries (1987). Use of soil survey information for assessing the phosphate sorption capacity of heavily manured soils. Dans: *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*, W.A. Duijvenboden and H.G. van Waegeningh (Eds), pp. 1079-1088. La Haye: National Institute of Public Health and Environmental Hygiene.
- Schreier, H. et M.A. Zulkifli (1983). A numerical assessment of soil survey data for agricultural management and planning. *Soil Survey and Land Evaluation*, 3: 41-53.
- Schwab, A.P. et S. Kulyingyong (1989). Changes in phosphate activities and availability indexes with depth after 40 years of fertilisation. *Soil Sci.*, 147: 179-186.
- Seber, G. (1984). *Multivariate observations*. New-York, John Wiley & Sons.
- Sharma, S. (1996). *Applied multivariate techniques*. New-York, John Wiley & Sons.
- Sharpley, A.N. (1995). Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *J. Environ. Qual.*, 24: 920-926.
- Sharpley, A.N. et A.D. Halvorson (1994). The management of soil phosphorus availability and its impact on surface water quality. Dans: *Advances in soil sciences: Soil processes and water quality*. R. Lal and B.A. Stewart (Eds.), p.7-90. Boca Raton: Lewis publishers.
- Sharpley, A.N. et R.G Menzel (1987). The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment. *Adv. Agron.*, 41: 297-324.
- Sharpley, A.N. et S. Rekolainen (1997). Phosphorus in agriculture and its environmental implications. Dans: *Phosphorus loss from soil to water*. H. Tunney et al. (Eds.), pp. 1-53. Wallingford (U.K.): CAB Int.
- Sharpley, A.N., T.C. Daniel, J.T. Sims et D.H. Pote (1996). Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *J. Soil Water Conserv.*, 51 (2): 160-166.
- Sharpley, A.N., T.C Daniel et D.R Edwards (1993). Phosphorus movement in the landscape. *J. Prod. Agric.*, 6: 492-500.
- Sharpley, A.N., U. Singh, G. Uehara et J. Kimble (1989). Modeling soil and plant phosphorus dynamics in calcareous and highly weathered soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 53: 153-158.
- Sharpley, A.N., S.J. Smith, B.A. Stewart et A.C. Mathers (1984). Forms of phosphorus receiving cattle feedlot waste. *J. Environ. Qual.*, 13: 211-215.
- Sheldrick, B.H et C. Wang (1993). Particle size distribution. Dans: *Soil sampling and methods of analysis*, M.R. Carter (éd.), pp.499-517. Boca raton, Lewis publishers.
- Sheard, J.W et D.W Geale (1983). Vegetation studies at Polar Bear Pass, Bathurst Island, N.W.T.I. Classification of plant communities. *Can. J. Bot.*, 61: 1618-1636.
- Simard, R.R. et C. Lapierre (1990). Les propriétés importantes pour la rétention des agents polluants. Dans: *Colloque sur la conservation de l'eau en milieu agricole*, C.P.V.Q. (éd.), pp.169-198, 12-13 février. Gouvernement du Québec.

- Simard, R.R., D. Cluis, G. Gangbazo et S. Beauchemin (1995). P status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *J. Environ. Qual.*, 24: 1010-1017.
- Simard, R.R., D. Cluis, G. Gangbazo et A.R. Pesant (1994). Phosphorus sorption and desorption indices in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25: 1483-1494.
- Simard, R.R., T.S. Tran et J. Zizka (1991). Evaluation of the electro-ultrafiltration technique as a measure of the K supplying power of Quebec soils. *Plant Soil*, 132: 91-101.
- Simard, R.R., C.R. De Kimpe et J. Zizka (1989). The kinetics of non-exchangeable potassium and magnesium release from Quebec soils. *Can. J. Soil. Sci.*, 69: 663-675.
- Simoneau, M. (1996). *Qualité des eaux du bassin de la rivière Châteauguay, 1979 à 1994*. Québec, Direction des écosystèmes aquatiques, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec.
- Simoneau, M. (1991). *Qualité de l'eau du bassin de la rivière Chaudière, 1976-1988*. Ste-Foy (Qc), Ministère de l'Environnement du Québec, 207 p.
- Simoneau, M., et Y. Grimard (1989). *Qualité des eaux du bassin de la rivière L'Assomption: 1976-1987*. Sainte-Foy (Qc), Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la qualité du milieu aquatique, 234 p. et 6 annexes.
- Sims, J.T. (1993). Environmental soil testing for phosphorus. *J. Prod. Agric.*, 6(40): 501-507.
- Sims, J.T., R.R. Simard et B.C. Joern (1998). Phosphorus losses in agricultural drainage: historical perspective and current research. *J. Environ. Qual.*, 27: 277-291.
- Sissingh, H.A. (1971). Analytical procedure of the Pw-method used for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands. *Plant Soil*, 34: 483-486.
- Sneath, P.H.A. et R.R. Sokal (1973). *Numerical taxonomy: The principles and practice of numerical classification*. San Francisco, W.H. Freeman and Company, 573 p.
- Stamm, C., H. Flüehler, R. Gächter, J. Leuenberger et H. Wunderli (1998). Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *J. Environ. Qual.*, 27: 515-522.
- Statistiques Canada (1997). *Profil agricole du Québec*. Recensement Agricole 1996. Division de l'agriculture. Ottawa, Canada.
- Systat Inc. 1997. *Systat for Windows, Version 7.0.1*. U.S.A, Statistiques Evanston II. 751p.
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré (1990). *Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles au Québec. Rapports synthèse*. Ste-Foy (Qc), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Gouvernement du Québec, 71 p.
- Taylor, R.W., W.F. Bleam et S.-I. Tu (1996). On the Langmuir phosphate adsorption maximum. *Commun. Soil Sci. Plant anal.*, 27 (13 & 14): 2713-2722.
- Thériault, A., L. Laplante, A. Mailloux et E. Pageau (1942). *Carte des sols du comté de Verchères*. Service de la Grande Culture, Ministère de l'Agriculture, 1 carte + 1 notice explicative.
- Tiessen, H. et J.O. Moir (1993). Total and organic carbon. Dans: *Soil sampling and methods analysis*, M.R. Carter (éd.), pp.187-200. Boca Raton, Lewis publishers.
- Tran, T.S. et M. Giroux (1987). Disponibilité du phosphore dans les sols neutres et calcaires du Québec en relations avec leurs caractéristiques chimiques et physiques. *Can. J. Soil Sci.*, 67: 1-16.

- Tran, T.S. et A. N' dayegamiye (1995). Long term effects of fertilizers and manure application on the forms and availability of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.*, 75: 281-285.
- Tran T, Sen et R.R. Simard (1993). Mehlich III extractable elements. Dans: *Soil sampling and methods of analysis*, M.R. Carter (éd.), pp.43-49. Boca Raton (Floride): Lewis Publishers.
- Van der Zee, S.E.A.T.M. et W.H. Van Riemsdijk (1988). Model for long-term phosphate reaction kinetics in soil. *J. Environ. Qual.*, 17: 35-41.
- Van der Zee, S. E. A. T. M. et W.H. Van Riemsdijk (1986). Sorption kinetics and transport of phosphate in sandy soil. *Geoderma*, 38: 293-309.
- Van der Zee, S.E.A.T. M., M.M. Nederlof, W.H. Van Riemsdijk et F.A.M. De Haan (1988). Spatial variability of phosphate adsorption parameters. *J. Environ. Qual.*, 17: 682-688.
- Van der Zee, S.E.A.T.M., L.G.J. Fokkink et W.H. Van Riemsdijk (1987). A new technique for assessment of reversibly adsorbed phosphate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 599-604.
- Vivekanandan, M. et P.E. Fixen (1990). Effect of large manure applications on soil P intensity. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 21: 287-297.
- Vollenweider, R.A (1968). *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication*. Paris, Pub. No. DAS/SAI/68.27, Organ. Econ. Coop. Dev.
- Walton, C.P. et G.F Lee (1972). A biological evaluation of the molybdenum blue method for orthophosphate analysis. *Tech. Int. Ver. Limnol.*, 18: 676-684.
- Ward, J.H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of American Statistical Association*, 58: 236-244.
- Webster, R. et M.A. Oliver (1990). *Statistical methods in soil and land resource survey*. New-York, Oxford university press, 316 p.
- Yuan, T.L. et H.L. Breland (1969). Correlation of Al and Fe as extracted by different reagents with phosphate retention in several soil groups. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.*, 29: 78-86.



# ANNEXE A: REPRÉSENTATION DES COMTÉS PÉDOLOGIQUES ET M.R.C. DE LA RÉGION ÉTUDIÉE



Source: Adapté Martin et Nolin (1991)

Figure A.1: Position géographique des comtés de la région étudiée dans le Québec méridional.

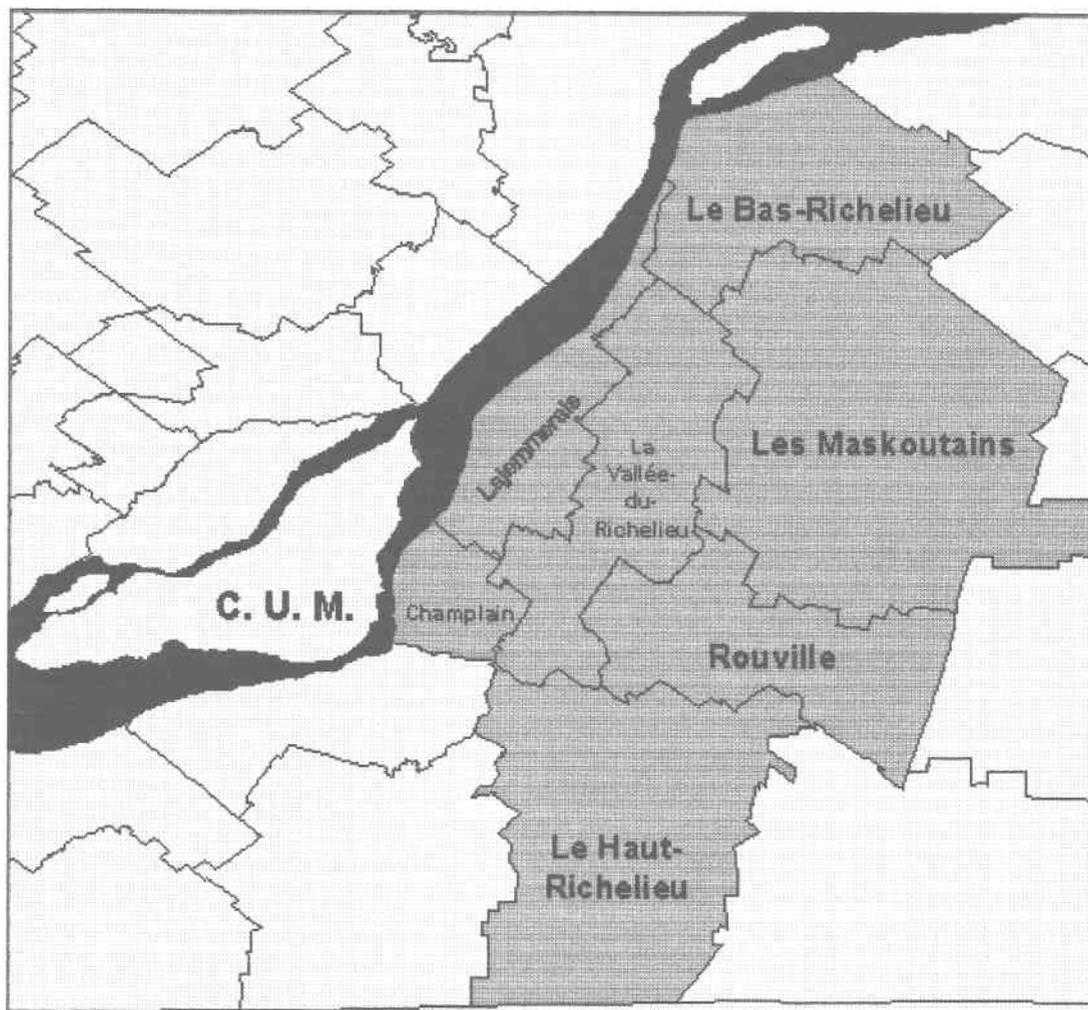


Figure A.2: Localisation des différentes M.R.C. présentes dans la région agricole de la plaine de Montréal

# ANNEXE B: DESCRIPTION DES SOLS

Tableau B.1: Description sommaire des différentes séries sélectionnées de la région étudiée

Série de sols et symbole	Matériau	Origine	Sous-groupe	Superficie totale de chaque série (ha)					Superficie totale (ha)	Type de sols	Texture de surface
				Richelieu	Verchères	St-Hyacinthe	Chambly	Rouville			
Saint-Aimé AI	Limoneux-grossier	estuarien	Gleysol humique orthique	2 575.0	49.5	1 388.5			4 013.0	A12 A13 A13H	Loam sableux Loam Loam humifère
St-Aimé, variante non calcaire AIA	Limoneux-grossier	estuarien	Gleysol humique orthique	2 089.6	224.1	1 715.9			4 029.6	AIA.3	Loam
St-Aimé, substratum argileux calcaire AIB	Limoneux-grossier déposé en placage sur matériau argileux	estuarien	Gleysol humique orthique	1 192.7	44.7	612.7			1 850.1	AIB2	Loam sableux fin
Aston AS	Sableux déposé en placage sur matériau argileux	fluvialite sur marin	Gleysol humique orthique	161.8	906.8	2 126.4	131.6	1 115.9	4 442.5	ASA1 ASA2	Sable fin loameux Loam sableux fin
Aston, variante calcaire ASA	Sableux déposé en placage sur matériau argileux calcaire	fluvialite sur marin	Gleysol humique orthique	1 456.8	156.4	2 541.8		128.8	4 283.8	ASA1 ASA2	Sable fin Loam sableux fin
Boucherville BC	Loameux-grossier (till) calcaire	glaciaire	Gleysol humique orthique		765.2	46.5	1 087.9	523.3	2 422.9	BC3 BC4	Loam Loam argileux
Sainte-Brigide BG	Loameux (till) 1-30 % fragments grossiers	glaciaire	Gleysol humique orthique				578.6	3 124.9	3 703.5	BG3	Loam
Sainte-Brigide, variante non calcaire BGA	Loameux-grossier (till) 1-30 % fragments grossiers	glaciaire	Gleysol humique orthique				172.2	594.6	766.8	BGA3	Loam

Tableau B.1: (suite)

Série de sols et symbole	Matériau	Origine	Sous-groupe	Superficie totale de chaque série (ha)					Superficie totale (ha)	Type de sols	Texture de surface
				Richelieu	Verchères	St-Hyacinthe	Chambly	Rouville			
Du Bourrelet BR	Limoneux-grossier	fluviale	Podzol humo-ferrique gleyifié	16.3	396.5	1 454.7	372.1		2 239.6	BR2 BR3	Loam sableux fin Loam
Corbin CB	Loameux-grossier déposé en placage sur matériau argileux	fluviale sur marin	Gleysol humique orthique			1 626.7			1 626.7	CB3	Loam
Charlemagne CL	Squelettique-loameux déposé en placage sur matériau argileux	fluviale sur marin	Brunisol sombre gleyifié		467.3	297.7	60.9		825.9	CL3	Loam
Du Contour CT	Loameux-grossier déposé en placage sur matériau argileux	fluviale sur marin	Gleysol humique orthique	42,5	937.0	3 661.0		247.5	4 888.0	CT2 CT3	Loam sableux Loam
Chambly CY	Argileux-fin avec lits loam sableux fin, loam limoneux ou sable fin	Pro-glaciaire	Gleysol humique orthique	2 019.4	182.3			2 243.2	4 444.9	CY5	Argile limoneuse
Saint-Damase DA	Sableux déposé en placage sur matériau argileux	fluviale sur marin	Gleysol humique orthique	51.8	447.8	2 352.3	960.8	133.7	3 946.4	DA1 DA2	Sable loameux Loam sableux fin

Tableau B.1: (suite)

Série de sols et symbole	Matériau	Origine	Sous-groupe	Superficie totale de chaque série (ha)					Superficie totale (ha)	Type de sols	Texture de surface
				Richelieu	Verchères	St-Hyacinthe	Chambly	Rouville			
Du Jour DJ	Argileux-fin, avec 0-20 % fragments grossiers, déposé en placage sur matériau argileux	fluviale	Gleysol humique orthique	141.2	2 775.1	2 640.5	258.1	1 189.4	7 004.3	DJ3 DJ4	Loam Loam argileux
Fleury FY	Sableux sur substratum loameux	fluviale sur marin	Gleysol humique orthique			2 524.0	2 772.4		5 296.4	FY1 FY2 FY2H	Sable fin loameux Loam sableux fin Loam sableux fin humifère
St-Hyacinthe HY	Limoneux-fin stratifié de loam limono-argileux	estuarien	Gleysol humique orthique			8 883.1		1 922.9	10 806.0	HY3 HY4	Loam limoneux Loam limono-argileux
Joseph JS	Sableux constitué surtout de sable fin à très fin	fluviale	Gleysol humique orthique		3 509.7	2 463.2	4 124.8	2 205.0	12 302.7	JS1 JS2 JS2H	Sable fin Loam sableux fin Loam sableux fin humifère
Saint-Jude JU	Sableux constitué surtout de sable moyen et grossier	fluviale	Podzol humo-ferrugineux glyifié		545.0	2 180.9	1 098.9	1 176.5	5 001.3	JU1	Sable loameux
Laplaine LP	Argileux-très fin, généralement calcaire	marin	Gleysol humique orthique	82.8	544.6	91.6			719.0	LP4H	Loam limono-argileux humifère

Tableau B.1: (suite)

Série de sols et symbole	Matériau	Origine	Sous-groupe	Superficie totale de chaque série (ha)					Superficie totale (ha)	Type de sols	Texture de surface
				Richelie	Verchères	St-Hyacinthe	Chambly	Rouville			
Kierkoski	Argileux-fin stratifié de lits d'argile limoneuse et loam sableux très fin, calcaire	estuarien	Gleysol humique orthique			4 311.0	911.6	245.6	5 468.2	KI2 KI3 KI4	Loam sableux fin Loam Loam argileux
St-Marcel	Argileux fin stratifié ou squelettique-loameux 0 -59 % fragments grossiers, déposé en placage sur un matériau argileux-très fin	estuarien	Gleysol Humique orthique	231.7	3 207.6		358.5	1 346.5	5 144.3	MA4 MA5	Loam argileux Argile limoneuse
Michaudville	Sableux, constitué de sable fin, déposé en placage sur un matériau loameux	fluvialile sur marin	Gleysol humique orthique		67.9	1 963.0	1 054.6		3 085.5	MC1 MC2	Sable fin loameux Loam sableux fin
Massueville	Sableux, non calcaire	fluvialile	Gleysol humique orthique		1 962.2	2 915.0	3 150.9	1 198.2	9 226.3	MS1 MS2	Sable fin loameux Loam sableux fin
St-Ours	Limoneux-fin déposé en placage mince sur un matériau limoneux-grossier	estuarien	Gleysol humique orthique				653.9	104.6	758.5	OU3	Loam
St-Ours, calcaire	Limoneux-fin, déposé en placage mince sur un matériau limoneux-grossier	estuarien	Gleysol humique orthique				485.8		485.8	OUA3	Loam limoneux

Tableau B.1: (suite)

Série de sols et symbole	Matériau	Origine	Sous- groupe	Superficie totale de chaque série (ha)					Type de sols	Texture de surface
				Richelieu	Verchères	St-Hyacinthe	Chambly	Rouville		
Pierreville PI	Loameux-grossier	fluviale	Gleysol humique orthique	93.1			1 272.5		PI3	Loam sableux très fin
Prairie PR	Sableux constitué surtout de sable fin, non calcaire	fluviale	Gleysol humique orthique		173.7	984.4	526.3		PR1 PR2	Sable fin loameux Loam sableux fin
La Présentation PS	Argileux, déposé en placage mince sur un matériau argileux non calcaire	fluviale sur marin	Podzol humique orthique			526.7	173.8		PS1	Sable fin loameux
Providence PV	Argileux-très fin, non calcaire	fluviale	Gleysol humique orthique	3 997.2	6 893.3	3 785.2	1 893.1	9 141.6	PV4 PV5	Loam argileux Argile limoneuse
Raimbault RB	Loameux-grossier alcalin, 1-40 % de graviers	glaciaire	Gleysol humique orthique						RB3	Loam
Ste-Rosalie RO	Argileux-très fin, généralement non calcaire	marin	Gleysol humique orthique	782.1	3 450.2	3 388.8	337.4	1 552.6	RO4 RO5	Loam limono-argileux Argile limoneuse
Ste-Rose RS	Loameux-grossier, non calcaire, avec dans solum 0-10% fragments grossiers	fluviale	Gleysol humique orthique	71.0	972.8	1 799.8	1 538.2	839.2	RS2 RS3	Loam limono-argileux Argile limoneuse

Tableau B.1: (suite)

Série de sols et symbole	Matériau	Origine	Sous-groupe	Superficie totale de chaque série (ha)					Superficie totale (ha)	Type de sols	Texture de surface
				Chambly	Verchères	St-Hyacinthe	Richelieu	Rouville			
St-Blaise SB	Argileux-fin, non calcaire, avec 0-10% fragments grossiers, en placage sur matériau loameux. 0-20 % graviers fins à moyens	fluviale sur marin	Gleysol humique orthique		494.4		2 070.0	167.6	2 732.0	SB4 SB5	Loam limono-argileux Argile limoneuse
St-Sophie SP	Sableux, non calcaire, 0-10% de fragments grossiers	fluviale	Podzol humo-ferrique orthique	640.6	283.5	292.2	31.7	712.3	1 960.3	SP1	Sable loameux
Sabrevois SV	Argileux-fin déposé en placage sur un matériau de till loameux-grossier	fluviale sur marin	Gleysol humique orthique				858.2	1 633.8	2 492.0	SV3 SV4	Loam Loam limono-argileux
Saint-Thomas TH	Sableux constitué surtout de sable fin, non calcaire	fluviale	Podzol humo-ferrique gleyifié	1 566.4	969.8	430.4			2 966.6	TH1	Sable fin
St-Urbain UB	Argileux-très fin, calcaire	marin	Gleysol humique orthique	473.4	6 369.4	4 858.1	1 878.8	1 961.5	15 541.2	UB3 UB4 UB5	Loam Loam limono-argileux Argile limoneuse
Yamaska YK	Loameux-grossier avec 0-10 % de fragments grossiers déposé en placage sur un matériau argileux	fluviale sur marin	Podzol humo-ferrique gleyifié	323.2	97.9	518.7			939.8	YK3	Loam

Source: (Nolin, 1990 ; Lamontagne et Nolin, 1990; Nolin et Lamontagne, 1990; Lamontagne, 1991; Martin et Nolin, 1991; Grenon et al., 1999)

## ANNEXE C: COMPARAISON DES INDICES G1 ET G2 DES VARIABLES BRUTES ET TRANSFORMÉES

Tableau C.1: Représentation des indices d'aplatissement et d'asymétrie des données brutes de la couche de surface et de leurs transformations logarithmiques.

Variables	Données brutes				Transformation logarithmique			
	G1	G1± 2*E1†	G2	G2± 2*E2‡	G1	G1± 2*E1†	G2	G2± 2*E2‡
PSI	2,32	2,61_ 2,03	8,05	8,63_ 7,46	-1,17	-0,88_ -1,47	7,78	8,36_ 7,19
PW	3,40	3,69_ 3,11	16,59	17,17_ 16,00	0,68	0,98_ 0,38	0,51	1,09_ -0,08
PM3	2,55	2,84_ 2,25	9,47	10,05_ 8,89	-0,24	0,06_ -0,54	0,19	0,78_ -0,39
CUM3	1,89	2,18_ 1,60	4,43	5,01_ 3,84	0,62	0,91_ 0,32	0,07	0,65_ -0,52
MNM3	13,01	13,30_ 12,71	196,91	197,49_ 196,33	0,39	0,68_ 0,09	1,63	2,21_ 1,05
FEM3	0,68	0,97_ 0,39	0,82	1,40_ 0,24	-0,35	-0,06_ -0,65	0,44	1,02_ -0,15
CAM3	3,17	3,46_ 2,87	20,73	21,32_ 20,15	-0,69	-0,40_ -0,99	0,50	1,09_ -0,08
KM3	1,80	2,10_ 1,51	3,00	3,59_ 2,42	-0,37	-0,08_ -0,67	0,77	1,35_ 0,18
MGM3	2,25	2,55_ 1,96	6,27	6,86_ 5,69	0,28	0,57_ -0,02	-0,64	-0,06_ -1,23
NAM3	3,79	4,08_ 3,50	19,87	20,46_ 19,29	0,74	1,03_ 0,44	0,39	0,98_ -0,19
ALM3	0,74	1,03_ 0,44	1,18	1,76_ 0,60	-0,32	-0,02_ -0,62	-0,35	0,24_ -0,93
POX	1,39	1,69_ 1,10	2,22	2,80_ 1,63	-0,29	0,01_ -0,59	0,03	0,61_ -0,56
ALOX	2,83	3,12_ 2,53	12,31	12,89_ 11,72	0,38	0,67_ 0,08	-0,17	0,41_ -0,76
FEOX	1,61	1,90_ 1,32	4,00	4,59_ 3,42	-0,27	0,02_ -0,57	-0,48	0,11_ -1,06
PHEAU	-0,14	0,16_ -0,43	-0,53	0,06_ -1,11	.	.	.	.
PHCA	-0,14	0,15_ -0,43	-0,57	0,02_ -1,15	.	.	.	.
CORG	3,27	3,57_ 2,98	11,78	12,36_ 11,20	1,64	1,93_ 1,34	3,40	3,98_ 2,82
CA	1,88	2,17_ 1,58	8,98	9,56_ 8,40	-0,67	-0,38_ -0,97	0,47	1,06_ -0,11
MG	1,42	1,71_ 1,13	1,46	2,05_ 0,88	0,41	0,70_ 0,11	-0,72	-0,13_ -1,30
K	2,05	2,34_ 1,76	5,65	6,24_ 5,07	1,43	1,72_ 1,13	2,55	3,13_ 1,96
NA	5,71	6,00_ 5,42	45,27	45,85_ 44,68	3,53	3,82_ 3,23	17,74	18,32_ 17,15
CEC	1,67	1,96_ 1,38	3,93	4,51_ 3,35	0,22	0,51_ -0,08	-0,21	0,38_ -0,79
PBR2	2,27	2,56_ 1,98	7,97	8,56_ 7,39	0,00	0,29_ -0,30	-0,28	0,31_ -0,86
ATOT	1,11	1,40_ -0,81	0,69	1,27_ 0,10	.	.	.	.
STOT	-0,22	0,07_ -0,51	-1,05	-0,47_ -1,63	.	.	.	.

† L'écart-type E1= 0,15 des données brutes et données transformées

‡ L'écart-type E2= 0,29 des données brutes et données transformées

Tableau C.2: Représentation des indices d'aplatissement et d'asymétrie des données brutes et transformées du sous-sol

Variables	Données brutes				Transformation logarithmique			
	G1	G1± 2*E1†	G2	G2± 2*E2‡	G1	G1± 2*E1†	G2	G2± 2*E2‡
PSI	3,81	4,26_3,37	21,24	22,12_20,36	-0,56	-0,11_-1,00	1,21	2,09_0,33
PW	2,35	2,79_1,90	6,57	7,45_5,69	0,52	0,96_0,08	0,58	1,46_-0,30
PM3	2,52	2,96_2,07	6,27	7,15_5,39	0,4	0,84_-0,05	-0,35	0,53_-1,23
CUM3	2,31	2,76_1,87	6,35	7,23_5,47	0,81	1,25_0,36	0,29	1,17_-0,59
MNM3	1,74	2,18_1,30	2,97	3,85_2,09	-0,02	0,42_-0,46	-1,04	-0,16_-1,92
FEM3	0,84	1,29_0,40	0,09	0,97_-0,80	-0,03	0,41_-0,48	-0,55	0,33_-1,43
CAM3	1,08	1,52_0,64	0,57	1,45_-0,32	-1,4	-0,96_-1,85	5,1	5,98_4,22
KM3	2,89	3,34_2,45	9,2	10,08_8,32	0,25	0,69_-0,20	-0,31	0,57_-1,19
MGM3	1,54	1,98_1,10	1,43	2,31_0,55	0,26	0,71_-0,18	-1,18	-0,30_-2,06
NAM3	3,14	3,59_2,70	11,53	12,41_10,65	0,27	0,71_-0,18	-0,34	0,54_-1,22
ALM3	0,75	1,19_0,30	0,11	0,99_-0,77	-0,75	-0,30_-1,19	1,36	2,24_0,48
POX	2,01	2,46_1,57	5,26	6,14_4,38	0,21	0,65_-0,24	-0,35	0,53_-1,23
ALOX	2,76	3,21_2,32	8,16	9,04_7,28	-0,25	0,19_-0,70	0,72	1,60_-0,16
FEOX	1,33	1,77_0,88	3,63	4,51_2,75	-0,86	-0,42_-1,31	0,76	1,64_-0,13
PHEAU	-0,12	0,33_-0,56	-0,81	0,07_-1,69	.	.	.	.
PHCA	-0,03	0,42_-0,47	-1,04	-0,16_-1,92	.	.	.	.
CORG	4,05	4,50_3,61	20,69	21,57_19,81	2,28	2,73_1,84	6,1	6,98_5,22
CA	0,58	1,02_0,14	-0,91	-0,03_-1,79	-0,26	0,18_-0,71	-1,15	-0,27_-2,03
MG	1,53	1,97_1,08	1,72	2,60_0,84	0,52	0,96_0,07	-1,06	-0,18_-1,94
K	3,21	3,65_2,76	15,48	16,36_14,60	2,06	2,50_1,62	6,56	7,44_5,68
NA	5,32	5,76_4,88	34,52	35,40_33,64	3,5	3,95_3,06	15,56	16,44_14,68
CEC	0,85	1,29_0,41	-0,26	0,62_-1,14	-0,06	0,39_-0,50	-0,95	-0,07_-1,83
PBR2	0,75	1,20_0,31	0,46	1,34_-0,42	-1,31	-0,86_-1,75	3,38	4,26_2,50
ATOT	1,13	1,58_0,69	0,16	1,04_-0,72	.	.	.	.
STOT	-0,11	0,33_-0,55	-1,41	-0,53_-2,29	.	.	.	.

† L'écart-type E1= 0,22 des données brutes et données transformées

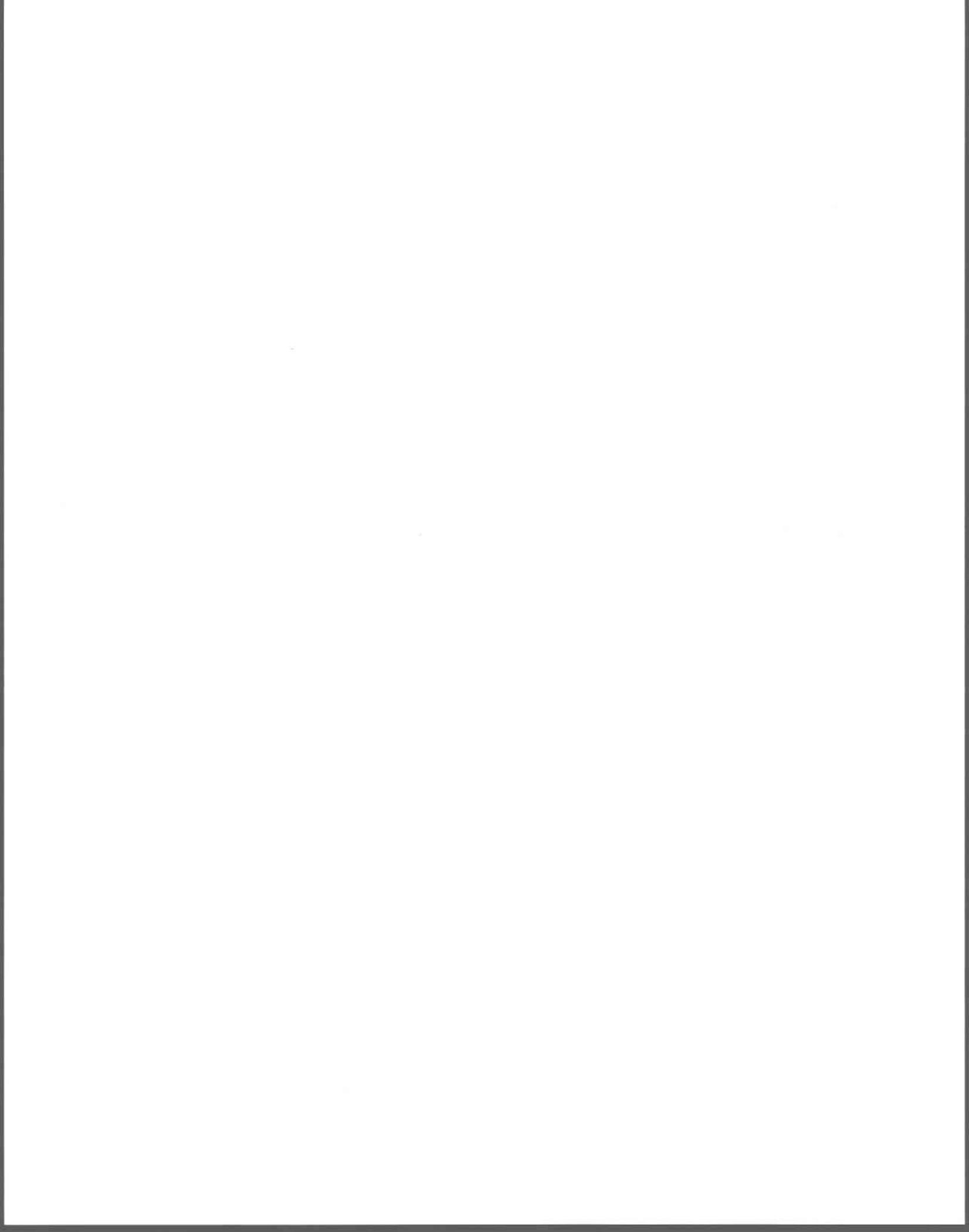
‡ L'écart-type E2= 0,44 des données brutes et données transformées

Tableau C.3: Représentation des indices d'aplatissement et d'asymétrie des données brutes et transformées du substratum

Variables	Données brutes				Transformation logarithmique			
	G1	G1± 2*E1†	G2	G2± 2*E2‡	G1	G1± 2*E1†	G2	G2± 2*E2‡
PSI	0,78	1,22_0,33	1,97	2,86_1,08	-1,18	-0,73_-1,63	1,76	2,65_0,87
PW	6,02	6,46_5,57	50,45	51,34_49,57	0,39	0,84_-0,06	2,35	3,24_1,46
PM3	7,40	7,85_6,95	61,52	62,41_60,63	0,84	1,29_0,39	1,52	2,41_0,64
CUM3	2,02	2,47_1,57	4,44	5,32_3,55	0,34	0,79_-0,11	0,42	1,31_-0,47
MNM3	1,77	2,21_1,32	3,18	4,06_2,29	-0,72	-0,27_-1,17	0,77	1,65_-0,12
FEM3	0,92	1,37_0,48	0,16	1,05_-0,73	0,32	0,77_-0,13	-0,77	0,12_-1,66
CAM3	1,95	2,40_1,50	6,00	6,89_5,12	-1,23	-0,78_-1,68	0,91	1,80_0,03
KM3	2,03	2,48_1,58	3,45	4,34_2,56	-0,64	-0,20_-1,09	0,75	1,64_-0,14
MGM3	0,84	1,29_0,39	-0,35	0,54_-1,24	-0,5	-0,06_-0,95	-0,92	-0,04_-1,81
NAM3	4,08	4,53_3,63	20,38	21,27_19,49	-0,02	0,43_-0,47	-0,29	0,60_-1,18
ALM3	0,87	1,32_0,42	0,19	1,08_-0,70	-0,91	-0,46_-1,36	0,78	1,67_-0,11
POX	0,40	0,85_-0,05	-0,60	0,29_-1,49	-0,66	-0,21_-1,11	-0,44	0,44_-1,33
ALOX	1,15	1,60_0,71	3,17	4,06_2,28	-0,71	-0,26_-1,16	-0,24	0,64_-1,13
FEOX	0,90	1,35_0,45	1,90	2,79_1,02	-0,99	-0,54_-1,43	2,05	2,94_1,16
PHEAU	-0,56	-0,11_-1,01	-0,47	0,42_-1,35	.	.	.	.
PHCA	-0,58	-0,13_-1,03	-0,70	0,19_-1,59	.	.	.	.
CORG	9,00	9,45_8,55	89,34	90,23_88,45	5,80	6,25_5,35	45,63	46,52_44,74
CA	0,19	0,64_-0,26	-0,90	-0,02_-1,79	-1,03	-0,58_-1,47	0,09	0,97_-0,80
MG	0,66	1,11_0,22	-0,53	0,36_-1,41	-0,22	0,23_-0,67	-1,21	-0,33_-2,10
K	0,67	1,11_0,22	-0,57	0,32_-1,45	0,42	0,86_-0,03	-0,99	-0,10_-1,88
NA	4,89	5,34_4,44	28,53	29,41_27,64	2,79	3,24_2,35	9,85	10,74_8,97
CEC	0,42	0,87_-0,02	-1,01	-0,12_-1,90	-0,36	0,09_-0,80	-1,05	-0,17_-1,94
PBR2	0,58	1,03_0,14	-0,34	0,55_-1,22	-1,39	-0,94_-1,84	4,82	5,71_3,93
ATOT	0,34	0,79_-0,11	-1,28	-0,40_-2,17	.	.	.	.
STOT	0,72	1,17_0,27	-0,86	0,03_-1,74	.	.	.	.

† L'écart-type E1= 0,22 des données brutes et données transformées

‡ L'écart-type E2= 0,44 des données brutes et données transformées



# ANNEXE D: GROUPEMENT DES TYPES DE SOLS À PARTIR DES DESCRIPTEURS DE LA COUCHE DE SURFACE

Tableau D.1: Groupements de sols de la couche de surface effectués par la méthode de  
Ward

Sous-groupes							
1a	1b	2	3a	3b	4a	4b	5
HY-LLI	UB-L (LS)	OU-L	OUA-LLI (L)	SV-L (LA)	SV-LLIA (LA)	MA-ALI	JS-SFL
RB-L	CT-LS (L)	JS-LSFH (L)	DJ-LA (LSA)	FY-LSF (L)	DJ-L (LLi)	RO-ALI (A)	DA-SFL
ASA-LSF (LS)	MS-SFL	JS-LSFH (LSF)	CT-L	KI-L	PV-ALI (L)	UB-ALI (A)	ASA-SFL (SL)
PR-LSF (LS)	HY-LLI (L)	YK-L (SFL)	JS-LSFH (LS)	DJ-L	MA-ALI	PV-ALI	PR-LSF
AIB-LSF (LS)	KI-LSF (LS)	YK-L (LSTF)	AIA-L (LLi)	KI-L	CT-L	UB-ALI (A)	JS-SFL (SF)
FY-LSF (LS)	AIA-L (LSF)	SV-L	KI-LA (LLiA)	UB-L	JS-LSFH (LSF)	RO-ALI (A)	PR-SFL
DA-SFL	AI-LSF (LS)	YK-L	AIA-LA (LLi)	KI-L	SB-ALI	UB-ALI	JS-SFL
AI-LSF	ASA-LSF (LS)	PR-LSF (LS)	BC-L	RO-LLIA	SB-ALI	MA-LA	AS-SFL
ASA-LSF (LS)	RS-L (LSTF)	BR-LSF (LS)	PI-LSTF	UB-L	RO-LLIA (LA)	DA-LSF (LS)	PR-SFL (SL)
AS-SFL	SV-LLIA (LA)	JU-SL	OU-L (LLi)	CB-L	FY-LSFH (LSF)	CY-ALI	MS-SFL (SL)
FY-SFL	DA-SFL (SL)	RS-LSF (LS)	PI-LSTF	HY-LLIA	SB-LLIA (LA)	SB-ALI (A)	AS-LSF (LS)
FY-SFL (SF)	RS-LSF (LS)	JU-SL	AIA-L	BGA-L (LSA)	SB-LLIA (LA)	AI-LH (L)	JU-SL (LSF)
ASA-LSF	BG-L	MC-LSF (LS)	BC-L	SV-L	SB-LLIA	SB-LLIA	AS-LSF (LS)
OUA-LLI (LA)	KI-LSF (LS)	MS-LSF	BC-L	BR-LSF (LS)	DJ-LA	KI-LA	PR-LSF (LS)
OUA-LLI (LSF)	AI-LSF	BG-L	AI-L	BR-L (LLi)	HY-LLI	OU-L (LLi)	PR-SFL (SF)
MS-LSF	AI-L (LSF)	CL-L	OUA-LLI (L)	AI-L	HY-LLIA (LA)	SB-LLIA (LA)	ASA-SFL (SF)
	JS-LSF (LS)	DA-LSF (LS)	BG-L	HY-LLI (L)	BGA-L (LS)	AI-LH (L)	FY-SFL
	RS-L (LLi)	AIB-LSF	OU-L (LLi)	SV-LLIA (LSA)	FY-LSFH (LSF)	PV-LA (LLiA)	JS-SFL
	FY-LSF	MC-SFL	OU-L (LLi)	CB-L	BC-LA	MA-ALI	SP-SL
	PS-SFL (LS)	PI-LSTF (L)	RB-L (LSF)	KI-L	RB-L	CY-ALI (A)	ASA-SFL (SF)
	BGA-L (L)	JU-SL (SFL)	BC-LA (LLiA)	CB-L (LS)	DJ-L (LLi)	SB-ALI (A)	JS-LSF
	JS-LSF	CT-LS	MA-LA	SV-L	MA-LA	PV-LA (LLiA)	PR-LSF
	FY-SFL	DA-LSF (LS)	HY-LLI	UB-LLIA (LA)	PV-LA (LLiA)	PV-ALI	SP-SL
	AS-SFL	MC-SFL	CT-LS	AIA-L	MA-LA	RO-ALI	YK-L
	AS-LSF	JS-LSF (LS)	DJ-L	KI-LSF (LS)	SV-LLIA (LA)	CY-ALI (A)	TH-SF
	AI-LSF	BR-LSF	UB-L	KI-LA	FY-LSFH (LSF)	RO-ALI	TH-SF (SFL)
	KI-LSF (LS)	BR-L (LSTF)	RO-LLIA (LA)	CB-L	RO-LLIA (LA)	CY-ALI	DA-LSF (LS)
	PS-SFL (LS)	BR-L (LSTF)		RB-L	FY-LSFH (LSF)	RO-ALI (A)	MS-LSF (LS)
	BG-L	AI-L		UB-L	PV-LA	AI-LH (LSA)	PS-SFL
	PS-SFL	MS-LSF (LS)		HY-LLI (LLiA)	DJ-LA	PV-ALI	JU-SL
	AIB-LSF (LS)	RS-LSF (LS)		KI-LA		RO-LLIA (LA)	PI-LSTF (L)
	AS-SFL (SL)	MC-SFL		UB-LLIA (LSA)		BC-LA	SP-SL
	MC-SFL	MS-LSF (LS)		UB-LLIA (LA)		LP-LLIAH (ALi)	SP-SL (SF)
	TH-SF (LS)	RS-L		UB-LLIA (LA)		LP-LLIAH (A)	MS-SFL (SL)
	MC-LSF (LS)	CT-L (L)		MA-ALI		LP-LLIAH (LLiA)	DA-SFL (SF)
	PS-SFL (LSF)	RS-LSF (LS)		AI-LH (L)		LP-LLIAH (LA)	
	FY-LSF	BGA-L		HY-LLIA		BC-LA (L)	
	AIB-LSF	BR-LSF		UB-ALI (A)			
	AS-SFL (LSF)	CL-L (LSF)					
	PR-SFL	MS-SFL					
	MC-LSF (LS)	MS-SFL					
	ASA-SFL (SF)	BC-L					
	MC-SFL (SF)	TH-SF (SFL)					
		BR-L (LLi)					
		DJ-LA (LSA)					
		CL-L (LS)					
		SV-L					
		RS-L (LLi)					
		CL-L (LS)					
		CT-L					
		OUA-LLI (LSF)					
		CT-LS					

( ) texture de la couche de labour ( Horizon A et partie du B mélangés)

Tableau D.2: Résultats de la classification des types de sols effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs modernes.

	1a	1b	2	3a	3b	4a	4b	5	Bonne classification (%)
1a	12	4	0	0	0	0	0	0	75
1b	1	33	2	4	1	0	0	0	80
2	0	4	37	6	0	1	0	4	71
3a	0	0	0	24	2	1	0	0	89
3b	2	2	0	3	30	0	1	0	79
4a	0	0	0	4	0	24	2	0	80
4b	0	0	0	3	1	5	28	0	76
5	0	1	3	0	0	0	0	32	89
Total	15	44	42	44	34	31	31	36	79

Tableau D.3: Résultats de la classification des types de sols effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs traditionnels.

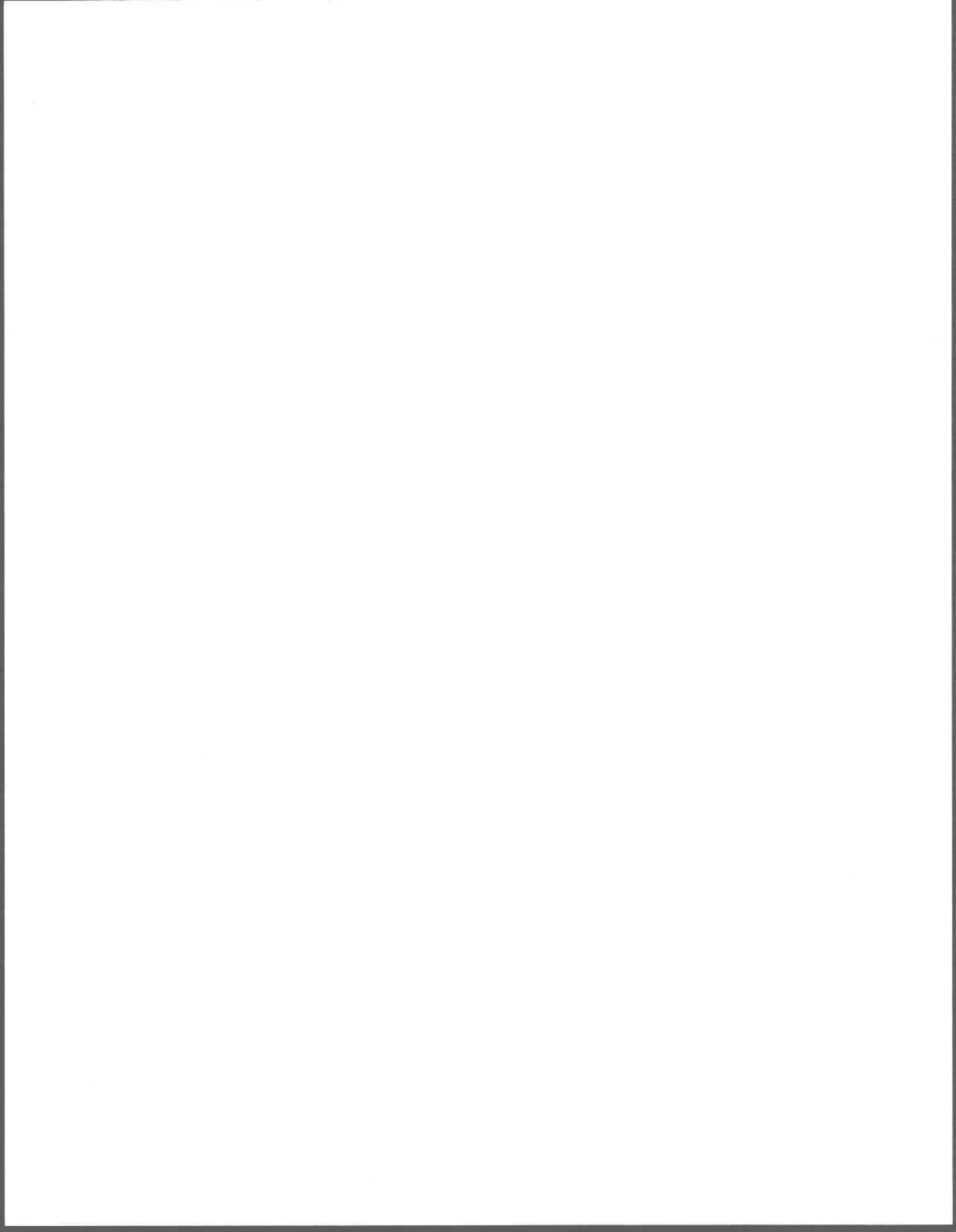
	1a	1b	2	3a	3b	4a	4b	5	Bonne classification (%)
1a	11	5	0	0	0	0	0	0	69
1b	10	20	5	4	0	0	0	2	49
2	0	8	38	0	0	2	0	4	73
3a	0	0	0	22	3	2	0	0	81
3b	3	1	0	2	30	0	2	0	79
4a	0	0	2	3	0	23	2	0	77
4b	0	0	0	3	0	4	30	0	81
5	0	0	5	0	0	0	0	31	86
Total	24	34	50	34	33	31	34	37	74

Tableau D.4: Classement des sols provenant de l'analyse de groupement hiérarchique modifié par l'analyse discriminante à partir d'indicateurs modernes et traditionnels.

Classement Analyse discriminante	Classement du groupement hiérarchique							
	1a	1b	2	3a	3b	4a	4b	5
1a		*AI-L †PR-SFL †MS-SFL †DA-SLF †AIA-L †UB-L †AS-SLF †PS-SFL †HY-LLI †AI-LSF †CT-LS			*KI-LSF *KI-L †BR-LSF †CB-L †AIA-L			
1b	*MS-LSF *ASA-LSF *OUA-LLI †FY-SFL †MS-LSF †FY-SFL †OUA-LLI †AIB-LSF		*ASA-SFL *MC-SFL *OUA-LLI *JS-LSF †BR-LSF †BR-L †MC-LSF †BR-L †CT-LS †BR-LSF †SV-L †CT-L		*KI-L *UB-L †KI-L			*JS-SFL
2		*PS-SFL *BGA-L †ASA-SFL †FY-SFL †AIB-LSF †MC-LSF †JS-LSF				†RB-L †SV-LLIA		*JU-SL *JU-SL *MS-LSF †PR-SFL †PS-SFL †JU-SL †DA-LSF †SP-SL
3a		*RS-LSF *BG-L *JS-LSF *SV-LLIA †AI-L †BG-L †JS-LSF †SV-LLIA	*BR-L *CL-L *CT-LS *CL-L *SV-L *CT-L		*AIA-L *RS-L *HY-LLIA †KI-LSF †UB-L	*DJ-L *PV-LA *MA-LA *MA-LA *SB-ALI †FY-LSFH †DJ-L †HY-LLI	*OU-L *AI-LH *SB-LLIA †OU-L †KI-LA †PV-LA	
3b		*UB-L		*OUA-LLI *MA-LA †AI-L †DJ-L †UB-L			*AI-LH	
4a			*RS-L †JS-LSFH †JS-LSFH	*OUA-LLI †CT-L †KI-LA			*AI-LSA *DA-LSF *BC-LA *BC-LA *MA-ALI †AI-LH †AI-LH †SB-LLIA †RO-LLIA	
4b					*MA-ALI †MA-ALI †UB-ALI	*PV-LA †PV-LA †SB-ALI		
5		†AS-SLF †BG-L	*JU-SL *AIB-LSF *DA-LSF *BR-LSF †RS-LSF †PI-LSTF †MC-LSF †DA-LSF					

\*Classement des sols effectué à partir des indicateurs modernes

† Classement des sols effectué à partir des indicateurs traditionnels



## ANNEXE E: GROUPEMENT DES SÉRIES DE SOLS À PARTIR DES DESCRIPTEURS DU SOUS-SOL

Tableau E.1: Groupements de sols du sous-sol effectués par la méthode de Ward

Sous-groupes				
1a	1b	2a	2b	2c
PV	SB	CT	FY	SP
LPA	OUA	CL	JS	MS
MA	SV	RB	JS	DA
LPA	KI	RS	FY	MC
RO	KI	CL	PR	PI
CY	BC	RS	DA	SP
UB	AI	PS	AS	BR
SB	OUA	MS	JS	BR
UB	SV	CT	MC	MS
PV	HY	CT	AS	TH
UB	AIA	PI	ASA	MC
RO	AI	PR	PR	PS
LP	AIA	RS	PI	TH
CY	AI	AIB	AS	JU
MA	OUA	AIA		CL
RO	OU	BGA		YK
CY	HY	BG		TH
KI	BC	BG		PS
SB	SV	RB		DA
	DJ	BC		JU
	MA	HY		YK
	DJ	CB		JU
	DJ	ASA		YK
	BGA	BGA		PS
	OU	RB		YK
	BR	AIB		SP
	PV	FY		HY
		AIB		
		CB		
		CB		
		BG		
		ASA		

Tableau E.2: Résultats de la classification des séries de sols effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs modernes.

	1a	1b	2a	2b	2c	Bonne classification (%)
1a	17	2	0	0	0	89
1b	4	22	1	0	0	81
2a	0	2	26	2	2	81
2b	0	0	0	12	2	81
2c	0	1	0	0	26	96
Total	21	27	27	14	30	87

Tableau E.3: Résultats de la classification des séries de sols effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs traditionnels.

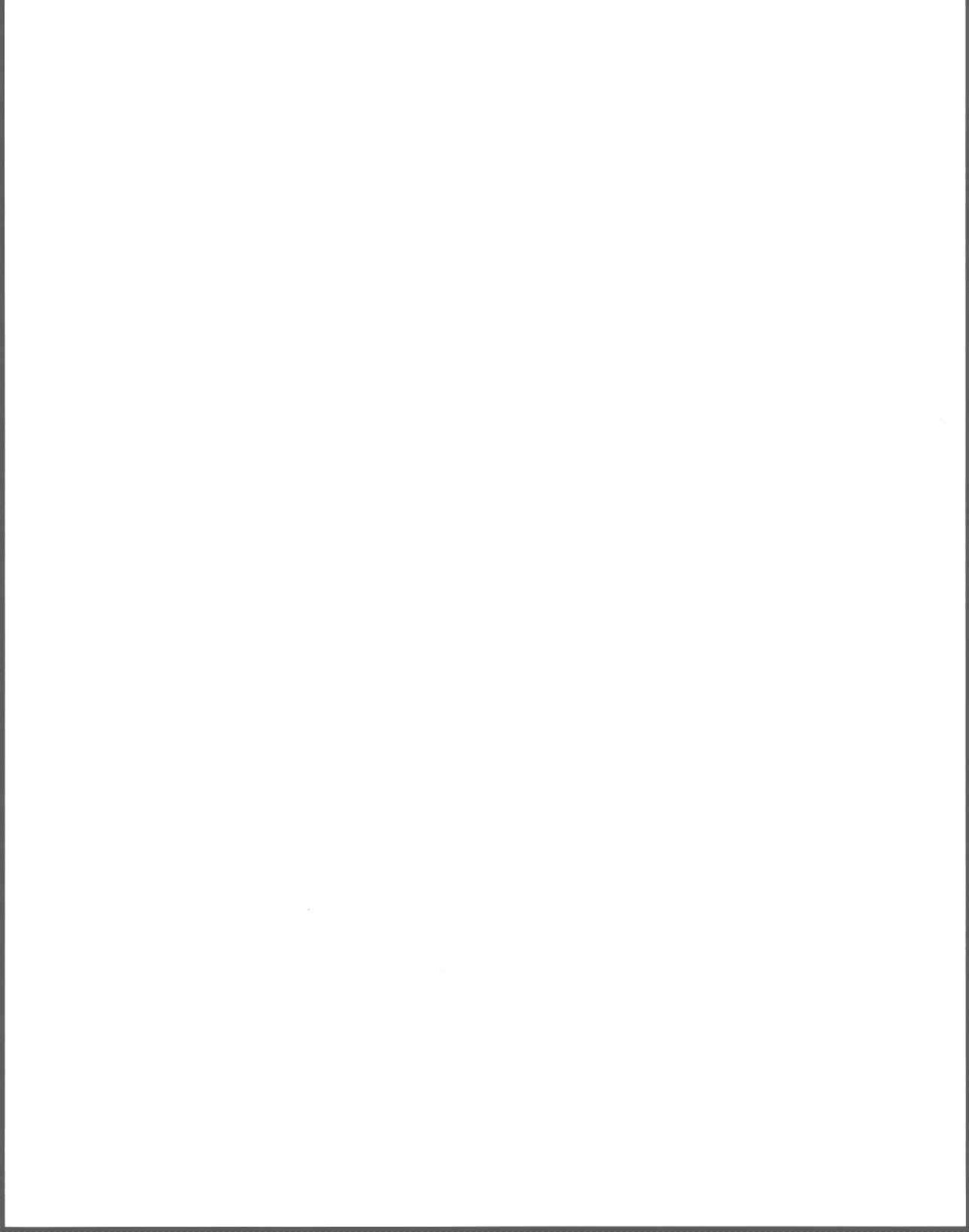
	1a	1b	2a	2b	2c	Bonne classification (%)
1a	17	2	0	0	0	89
1b	4	20	3	0	0	74
2a	0	4	23	5	0	72
2b	0	0	0	14	0	100
2c	0	0	0	5	22	81
Total	21	26	26	24	22	81

Tableau E.4: Classement des sols provenant de l'analyse de groupement hiérarchique modifié par l'analyse discriminante à partir d'indicateurs modernes et traditionnels.

Analyse discriminante	Groupement hiérarchique				
	1a	1b	2a	2b	2c
1a		*KI *OUA *PV †DJ †KI †OUA †PV			
1b	*MA *SB †MA †SB		*AIA *CB *CT *HY †BC †HY		†HY
2a		*BGA †AIA			
2b		*BR	*ASA *CT *CT *FY *MS *PS †ASA †PI	MC	*BR *BR *DA *MC *MS
2c			†MS †PS	†ASA †PR	

\*Classement des sols effectué à partir des indicateurs modernes

† Classement des sols effectué à partir des indicateurs traditionnels



## ANNEXE F: GROUPEMENT DES SÉRIES DE SOLS À PARTIR DES DESCRIPTEURS DU SUBSTRATUM

Tableau F.1: Groupements de sols du substratum effectués par la méthode de Ward

Sous-groupes				
1	2a	2b	3	4
AIA	LPA	AIA	LP	SP
SB	RO	SV	UB	SP
AI	RO	SB	ASA	TH
OUA	PV	AIA	RO	JU
OUA	MA	BR	UB	JU
FY	CY	RS	UB	TH
BGA	PS	MC	ASA	MS
OUA	PV	BR	CY	TH
FY	CT	YK	CB	SP
RB	HY	RS	KI	MS
BG	HY	MC	AIB	JU
RS	PS	AS	FY	PI
AI	CT	BR	ASA	JS
BC	AS	OU	AIB	BGA
AI	HY	PS	AIB	JS
BC	DA		CB	PI
KI	MA		CB	OU
BC	YK		CY	PR
BG	CL			MC
SB	CL			JS
SV	CL			BGA
SV	PV			PR
RB	LPA			MS
BG	MA			PR
RB	KI			PI
	DJ			
	DJ			
	CT			
	YK			
	DJ			
	DA			
	DA			
	AS			
	HY			

Tableau F.2: Résultats de la classification des séries effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs modernes.

	1a	1b	2a	2b	3	Bonne classification (%)
1a	24	0	0	1	0	96%
1b	0	24	0	1	0	96%
2a	0	0	30	2	2	88%
2b	0	0	0	15	0	100%
3	0	0	1	0	17	94%
Total	24	24	31	19	19	94%

Tableau F.3: Résultats de la classification des séries de sols effectuée avec les fonctions discriminantes construites à partir des indicateurs traditionnels.

	1a	1b	2a	2b	3	Bonne classification (%)
1a	23	1	0	1	0	92
1b	0	24	0	1	0	96
2a	0	0	30	2	2	88
2b	1	1	0	13	0	87
3	0	0	0	0	18	100
Total	24	26	30	17	20	92

Tableau F.4: Classement des sols provenant de l'analyse de groupement hiérarchique modifié par l'analyse discriminante à partir d'indicateurs modernes et traditionnels.

Analyse discriminante	Groupement hiérarchique				
	1a	1b	2a	2b	3
1a				†AIA	
1b	†RS			†AS	
2a				*AS	*CY
2b	†SB	*OU *BGA *PI †PI	*AS *HY †HY †HY		
3			*RO *RO †LP †RO		

\*Classement des sols effectué à partir des indicateurs modernes

† Classement des sols effectué à partir des indicateurs traditionnels

# ANNEXE G: CLASSIFICATION DES SOLS SELON LE MODÈLE ÉTABLI À PARTIR DES INDICATEURS TRADITIONNELS

---

Les types de sols ont été sélectionnés à partir des données analytiques<sup>1</sup> des comtés du sud-est de la plaine de Montréal (Tableau G.1) [Nolin, 1989].

Tableau G.1: Classification taxonomique des types de sols sélectionnés des comtés pédologiques du sud-est de la plaine de Montréal.

Types de sol	Grand groupe	Matériau	Types de sol	Grand groupe	Matériau
LR4, St-Laurent Loam limono-argileux	Gleysol humique	Argileux-fin, non calcaire	CH4, Des Chenaux Loam limono-argileux	Gleysol humique	Argileux-fin (stratifié de débris organiques peu décomposés), non calcaire
RG2, Rougemont Loam sableux	Podzol humo-ferrique	Squelettique-loameux, non calcaire	HE2, Sainte-Hélène Loam sableux grossier	Brunisol mélanique	Squelettique-sableux, fortement calcaire

Source: [C.E.P.A.C, 1987]

Chacun des sous-groupes est décrit par une équation discriminante. Ces fonctions de classification calculées pour chacun des groupes servent à attribuer chaque sol à un sous-groupe. Pour classer un type de sol, on doit insérer dans l'équation leurs mesures pour chacun des indicateurs (C.E.C., PHCA, PBR2, ATOT et MG) inclus dans le modèle de classification (Tableau 4.13). Un sol appartient à un sous-groupe lorsque la valeur obtenue de la fonction de classification de ce groupe est la plus élevée par rapport à celles des autres groupes. Il est important de vérifier que les unités de mesure de chacun des indicateurs provenant du type de sol à classer soient les mêmes que celles de notre étude (Tableau 3.5). La description des propriétés physico-chimiques des profils de sol sélectionnés dans les études pédologiques n'ont pas nécessairement les mêmes unités de mesure. Entre autres,

la C.E.C. et le Mg échangeable sont exprimés en  $\text{cmol kg}^{-1}$  mais ceci est comparable au milliéquivalent/100g utilisé dans les rapports pédologiques. La variable PBR2 exprimée en  $\text{mg kg}^{-1}$  dans l'étude, est plutôt, dans les rapports pédologiques, exprimée en  $\text{kg ha}^{-1}$ . On doit donc effectuer une division par un facteur d'équivalence de 2.24 pour obtenir la même unité de mesure. Par la suite, certaines mesures d'indicateurs provenant du type de sol à classer doivent subir la transformation logarithmique. Seules les mesures de PHCA et ATOT n'ont pas besoin de subir cette transformation.

C.E.C. =  $\text{Ln}(\text{mesure de C.E.C. du type de sol})$

PBR2 =  $\text{Ln}([\text{mesure de PBR2 du type de sol}] \div 2.24)$

Mg =  $\text{Ln}([\text{mesure de MG du type de sol}] + 1)$

Exemple de calcul pour le type de sol CH4 avec les mesures suivantes :

C.E.C. =  $\text{Ln}(19.84) = 2.99$

PHCA = 5.2

PBR2 =  $\text{Ln}(38) = 3.64$

ATOT = 23.7 %

Mg =  $\text{Ln}(2.68 + 1) = 1.30$

Équations de classification pour chacun des 8 sous-groupes

	Constante	C.E.C.	PHCA	PBR2	ATOT	MG	
1a	-186.17 +	(37.67 * 2.99) +	(26.78 * 5.2) +	(24.26 * 3.64) +	(0.35 * 23.7) +	(0.84 * 1.30)	=163.27
1b	-178.34 +	(41.16 * 2.99) +	(25.07 * 5.2) +	(23.16 * 3.64) +	(0.38 * 23.7) +	(-0.73 * 1.30)	=167.30
2	-159.53 +	(44.18 * 2.99) +	(22.64 * 5.2) +	(20.31 * 3.64) +	(0.36 * 23.7) +	(-2.62 * 1.30)	=169.19
3a	-209.39 +	(48.02 * 2.99) +	(26.60 * 5.2) +	(23.10 * 3.64) +	(0.49 * 23.7) +	(1.02 * 1.30)	=169.37
3b	-230.39 +	(44.94 * 2.99) +	(28.18 * 5.2) +	(26.56 * 3.64) +	(0.54 * 23.7) +	(3.65 * 1.30)	=164.58
4a	-198.38 +	(51.78 * 2.99) +	(24.21 * 5.2) +	(20.52 * 3.64) +	(0.53 * 23.7) +	(1.46 * 1.30)	=171.32
4b	-242.22 +	(53.32 * 2.99) +	(26.88 * 5.2) +	(23.16 * 3.64) +	(0.71 * 23.7) +	(5.83 * 1.30)	=165.53
5	-131.65 +	(36.48 * 2.99) +	(21.00 * 5.2) +	(20.23 * 3.64) +	(0.30 * 23.7) +	(-4.26 * 1.30)	=161.69

<sup>1</sup> Nolin, M.C. (1989). Statistiques descriptives des données analytiques extraites selon la série et le type de sol (couche de surface). Équipe pédologique du Québec, Agriculture Canada.

On constate que le type de sols LR4 fait parti du sous-groupe 4a, puisque la valeur obtenu de la fonction de classification est la plus élevée parmi les autres sous-groupes. Pour effectuer le calcul des valeurs de chacune des équations plus rapidement, l'emploi d'un chiffrier est indispensable. La classification des autres types de sol est présenté ci-dessous.

Le type de sol LR4 a été classifié dans le sous-groupe 4a avec une valeur de 205.16 avec les mesures suivantes :

$$\begin{aligned} \text{C.E.C.} &= \text{Ln}(25.60) = 3.24 & \text{PBR2} &= \text{Ln}(53.7) = 3.98 \\ \text{MG} &= \text{Ln}(3.56+1) = 1.52 & \text{PHCA} &= 5.6 & \text{ATOT} &= 30.4 \end{aligned}$$

Le type de sol RG2 a été classifié dans le sous-groupe 2 avec une valeur de 140.95 avec les mesures suivantes :

$$\begin{aligned} \text{C.E.C.} &= \text{Ln}(14.68) = 2.69 & \text{PBR2} &= \text{Ln}(43.1) = 3.76 \\ \text{MG} &= \text{Ln}(0.38+1) = 0.32 & \text{PHCA} &= 4.5 & \text{ATOT} &= 12.0 \end{aligned}$$

Type de sol HE2 a été classifié dans le sous-groupe 1b avec une valeur 164.09 avec les mesures suivantes :

$$\begin{aligned} \text{C.E.C.} &= \text{Ln}(14.35) = 2.66 & \text{PBR2} &= \text{Ln}(74.9) = 4.31 \\ \text{MG} &= \text{Ln}(0.69+1) = 0.52 & \text{PHCA} &= 5.1 & \text{ATOT} &= 14.1 \end{aligned}$$

