

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

ÉVALUATION DU RISQUE DE LESSIVAGE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS AGRICOLES

Thèse
présentée pour l'obtention
du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.)

par

Suzanne Beauchemin

Jury d'évaluation

Président du jury et examinateur externe

M. Angus McKenzie, professeur
Faculté des sciences de l'agriculture et de l'environnement
Université McGill

Examineur externe

Mme Thi Sen Tran, chercheure
Centre de recherche et d'expérimentation en sols, MAPAQ

Codirecteur de recherche et examinateur interne

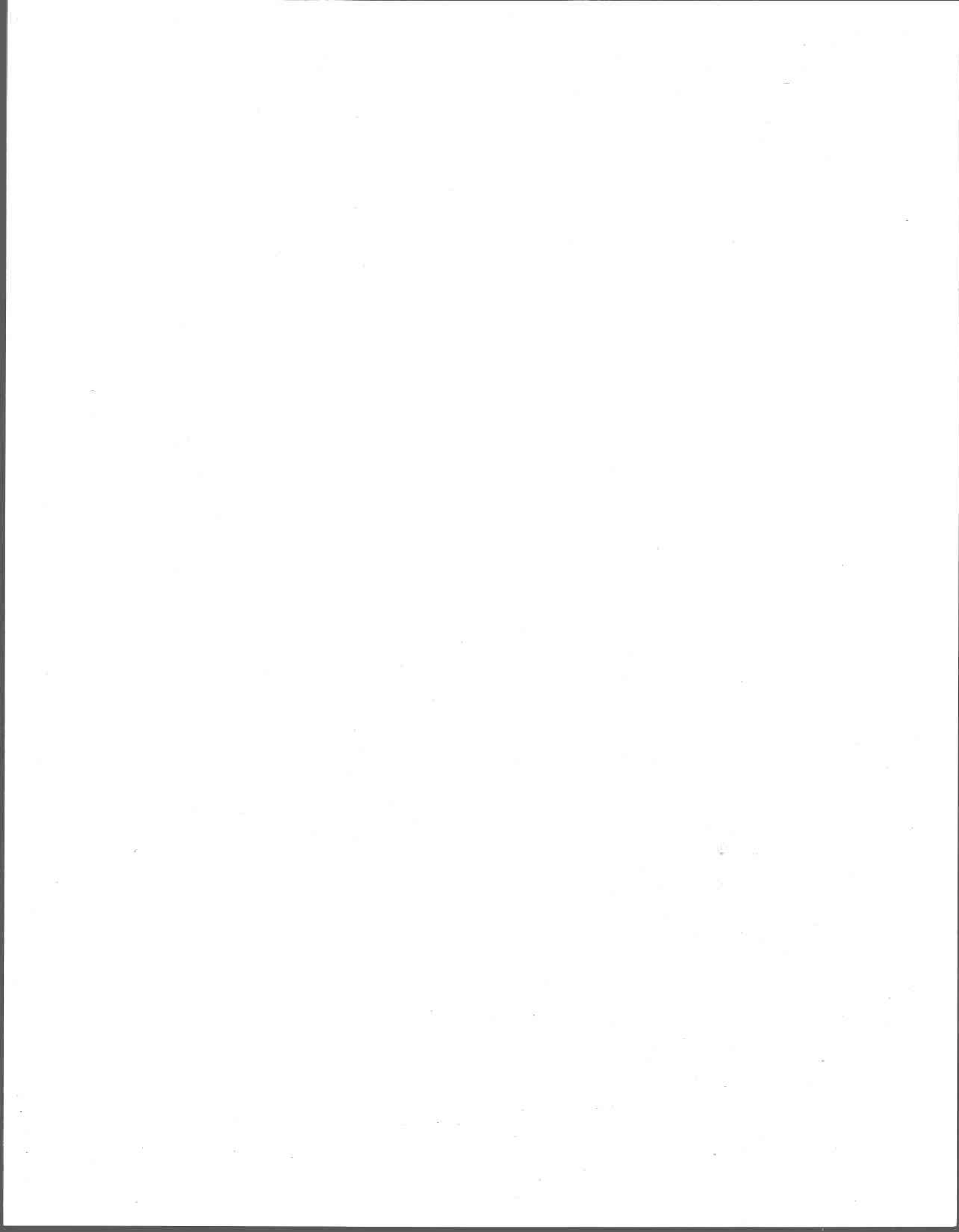
M. Régis Simard, chercheur
Centre de recherche et de développement sur les sols
et les grandes cultures.
Agriculture et Agroalimentaire Canada

Directeur de recherche

M. Daniel Cluis, professeur
INRS-EAU

Thèse soutenue le 16 décembre 1996

*À mes deux jolies brunettes,
Mathilde et
Aude-Éméline*



REMERCIEMENTS

Il me fait plaisir de pouvoir exprimer toute ma gratitude envers les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

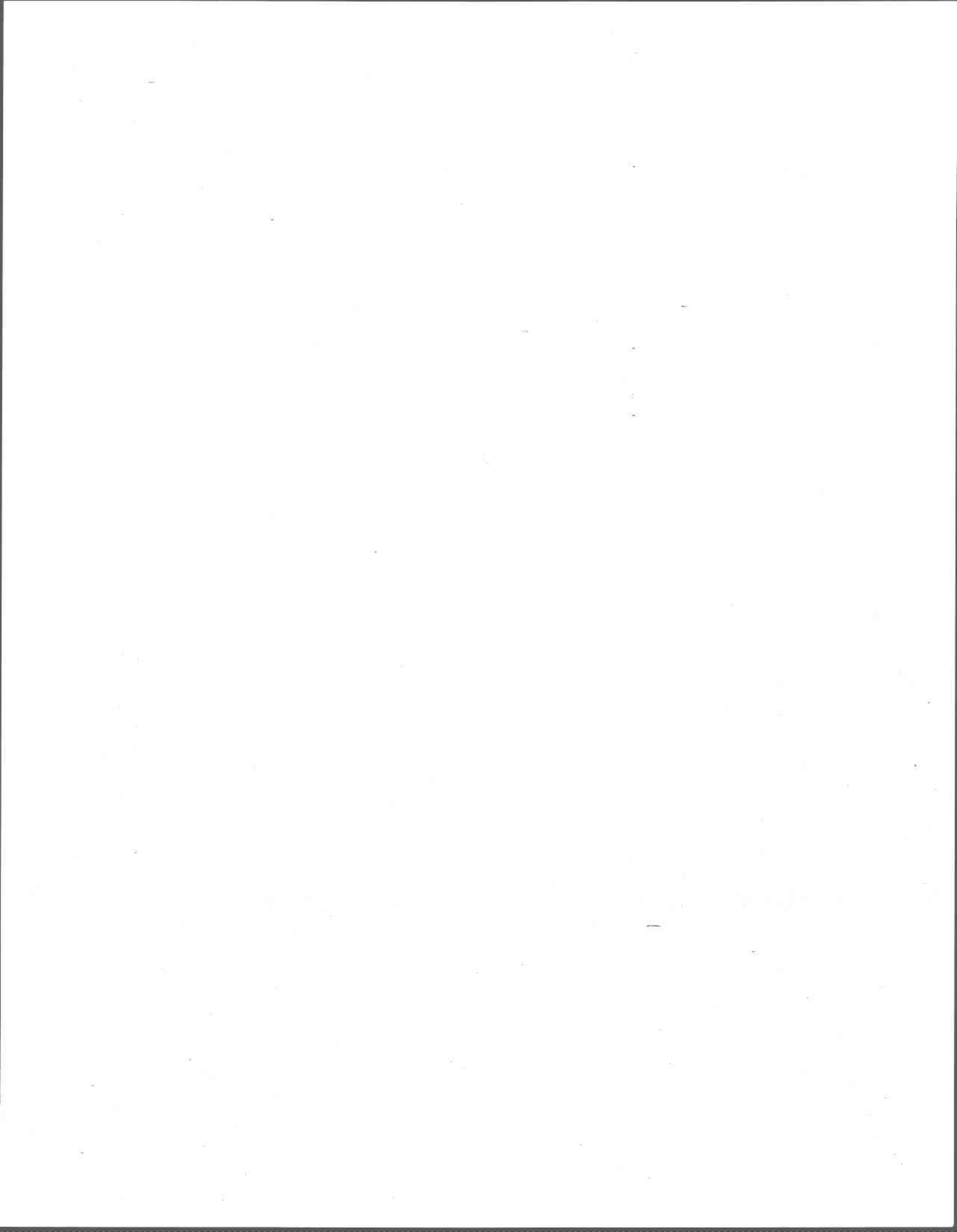
Je remercie mon directeur de thèse, Dr. Daniel Cluis, et mon co-directeur, Dr. Régis Simard d'Agriculture Canada, pour leur appui constant ainsi que leur aide financière au cours de ces trois années de recherche. Ma vision de la problématique du phosphore serait probablement restée à une échelle plus restreinte sans la collaboration de M. Cluis. Son réflexe quasi inné à vouloir généraliser les résultats à l'échelle d'un bassin m'a obligée à pousser plus loin ma réflexion. De même, l'expertise et l'optimisme inébranlable de M. Simard m'ont permis de mener à terme ce projet. Je lui suis particulièrement reconnaissante pour sa précieuse collaboration et ses critiques constructives lors de la rédaction des articles.

Je remercie aussi Dr. Franco Marsan pour les échanges fructueux que nous avons eus concernant divers aspects du projet de recherche. Ses conseils et sa révision minutieuse des deux premiers articles ont été fort appréciés. Merci également au Dr. Michel Nolin pour m'avoir éclairée, à quelques reprises, sur l'aspect pédologique de l'étude.

Je désire également souligner la contribution de Maurice Deschênes et de Sylvie Côté, d'Agriculture Canada, à la cueillette de données à certaines étapes du projet. Je les remercie sincèrement pour m'avoir fait bénéficier de leur expérience relative à diverses méthodologies en laboratoire. De même, je tiens à remercier une amie, Isabelle Royer, pour m'avoir généreusement donné de son temps lors de l'échantillonnage des eaux de drainage. Sa présence a transformé deux journées froides d'automne en une partie de plaisir!

De plus, je suis reconnaissante envers le Conseil national de recherches en sciences humaines du Canada, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada ainsi que le Conseil de recherches médicales du Canada pour m'avoir accordé la bourse Éco-Recherche pour les trois années d'études.

Enfin, je remercie avec coeur mon partenaire de tous les jours, Mario Beauchemin, pour sa patience, son encouragement, son soutien moral et ... sa logique implacable de physicien qui me furent d'une grande aide pour cheminer dans ce projet.



AVANT-PROPOS

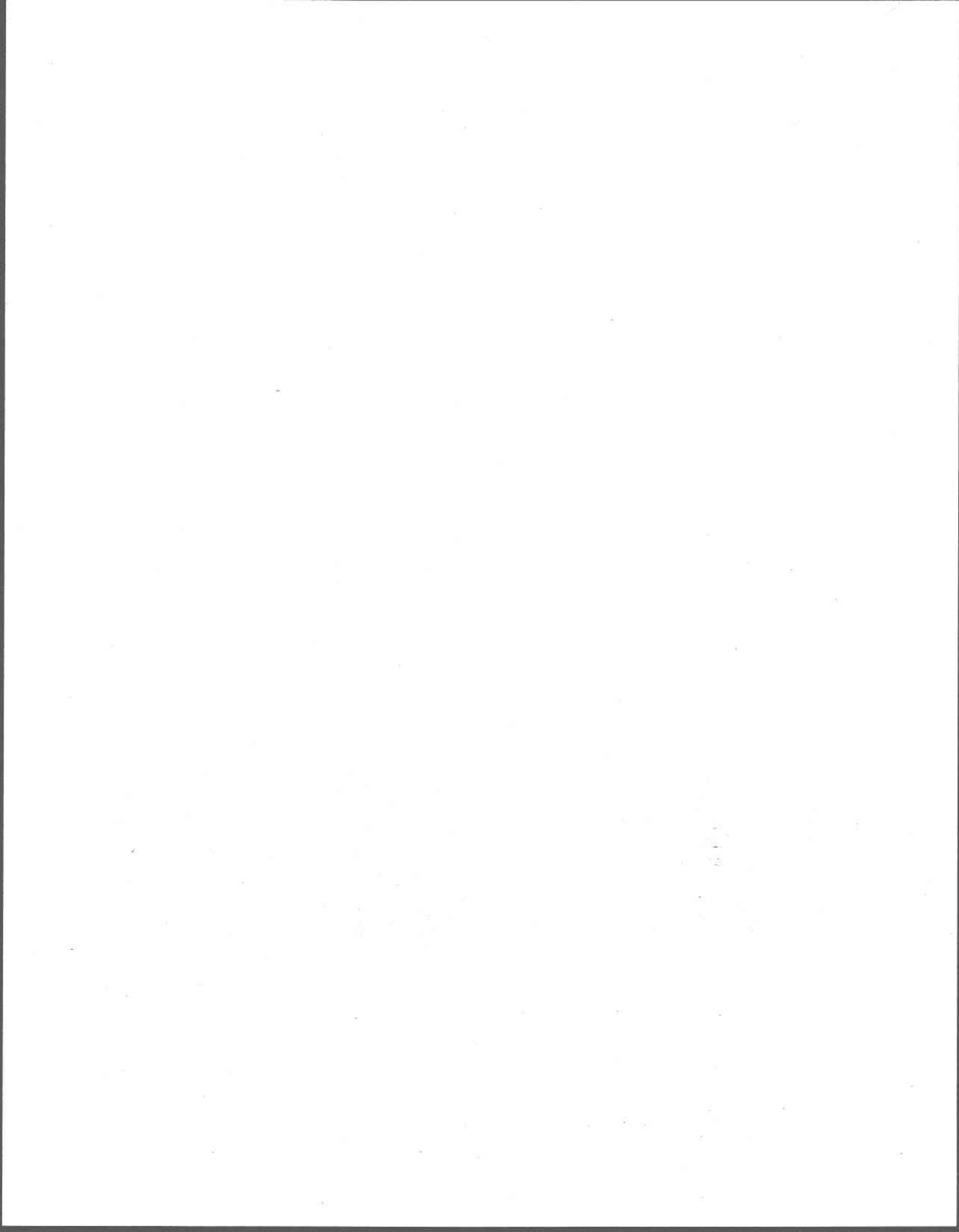
La thèse est rédigée sous forme de thèse par articles. Par conséquent, les articles constituent la majeure partie de la présentation. Ils sont regroupés à la fin du document et sont précédés par une synthèse des résultats.

Trois articles sont présentés:

Beauchemin, S., R. R. Simard, and D. Cluis (1996). P Sorption/Desorption Kinetics of Soil under Contrasting Land Uses. *J. Environ. Qual.*, 25: 1317-1325.

Beauchemin, S., R. R. Simard, and D. Cluis (1996). Forms and Concentrations of P in Drainage Water of Tile-Drained Soils in the St-Lawrence Lowlands. *J. Environ. Qual.*, (soumis).

Beauchemin, S., R. R. Simard, and D. Cluis (1996). Prediction of Drainage Water P Concentrations from Surface Soil Properties. *J. Environ. Qual.*, (soumis).



RÉSUMÉ

Les sols agricoles cultivés de façon intensive ou fertilisés depuis de nombreuses années avec des amendements organiques présentent aujourd'hui une accumulation notable en P, au point où leur capacité de fixation s'en trouve diminuée. Bien que le P soit habituellement un élément très peu mobile dans les sols, l'augmentation du pool de formes labiles sous ces conditions accroît le risque de lessivage en profondeur. Le but de la thèse est de documenter ce risque dans les sols agricoles de deux agro-écosystèmes nettement distincts, tant par la nature de leurs sols et des engrais appliqués, que par le type de gestion des sols qui y est pratiqué.

Le premier agro-écosystème est celui du bassin versant de la rivière Beaurivage. Il est caractérisé par une concentration importante de productions animales. Les sols majoritairement podzoliques et ayant une bonne capacité de rétention en P reçoivent une fertilisation principalement organique. La topographie de la région est ondulée avec des pentes variant de 2 à 5%. Une étude antérieure de caractérisation des formes de P dans les trois horizons des 5 séries de sols dominantes a démontré une augmentation significative du P soluble à l'eau dans l'horizon C des sols agricoles par rapport aux sols forestiers. Cette observation suggère une plus grande contribution des premiers à la contamination des eaux en P par lessivage. L'étude de ce système a été complétée en étudiant la cinétique de sorption et de désorption du P dans les trois horizons génétiques d'un sol Mawcook provenant de trois utilisations de sol très différentes: un site forestier (F) et deux sites agricoles associés à des apports modérés (D) ou excessifs (SN) de P. Des essais de lessivage ont été réalisés en utilisant une solution d'électrolytes de 0,01M KCl enrichie de 5 mg P L⁻¹ pour saturer le sol en P dans une première phase de sorption, puis en laissant percoler une solution d'électrolytes (0,01M KCl) non enrichie en P pour induire la désorption. Selon le modèle incrémental utilisé, il est estimé que la capacité résiduelle de sorption du P est de 50% moins élevée dans l'horizon A des sols agricoles étudiés que dans celui du site forestier. Cette capacité se révèle comparable dans l'horizon B. Dans l'horizon C, la capacité de sorption du sol SN est de 25% celle des deux autres sites. Après saturation des sols en P, la quantité potentiellement désorbable de P dans les horizons A et B des sites agricoles est deux fois plus grande que celle du site forestier. Les résultats suggèrent que le sol associé à la plus haute densité animale (SN) risque plus de perdre du P par lessivage que les sols associés à des densités animales moindres (F ou D).

Le deuxième agro-écosystème étudié est celui de la région de St-Hyacinthe. La production végétale y est plus intensive que dans le bassin de la Beaurivage et se distingue notamment par la culture de maïs-grain (*Zea mays* L.) et de soya (*Glycine max* Merrill.). Les sols sont de nature gleysolique; leur capacité de sorption en P est habituellement plus faible que celle des sols du bassin de la Beaurivage ayant une texture comparable. La majorité des sols cultivés sont plats et drainés souterrainement. L'étude de ce système a pour but de faire le point sur l'état de saturation des sols en P ainsi que sur la teneur en P des eaux de drainage afin d'établir de possibles relations entre les teneurs de P dans la couche de labour et celles de l'eau de drainage. Neuf séries de sols gleysoliques, à raison de 3 sites par série, ont été échantillonnées selon les 4 couches suivantes: 0-5 cm, horizons A, B et C. Diverses formes de P ont été caractérisées dans les échantillons de sol: P soluble à l'eau (P_w), P extractible au NaOH+Na₂EDTA et réactif au molybdate (Pi₀), P extractible au Mehlich III (M3P), P extractible à l'oxalate et réactif au molybdate (Pi_{ox}) et P total du sol (P_t). L'indice de saturation en P des sols a été calculé en divisant la teneur en Pi_{ox} par la somme des teneurs en Fe et Al extractibles à l'oxalate et exprimées en mmol kg⁻¹ (Pi_{ox}/(Fe_{ox}+Al_{ox})). L'eau de drainage a également été prélevée à chaque site en 1994 et 1995. Sa concentration en P total (TP), P dissous réactif au molybdate (DRP), P dissous organique (DOP), P total particulaire (TPP) et P total dissous (TDP) a été déterminée.

La norme de qualité des eaux de surface de $0,03 \text{ mg TP L}^{-1}$ est dépassée dans 14 sites sur 27 en 1994 mais dans seulement 6 sites sur 25 en 1995. Sur les 14 sites excédant la norme en 1994, 10 sont de nature argileuse et trois autres ont une texture sableuse. Le P associé à ces plus fortes concentrations se présente principalement sous forme TPP ($> 50\%$ du TP) alors que la forme DOP représente moins de 30% . Une situation inverse est notée pour 1995. Alors que les concentrations en TP excèdent rarement $0,03 \text{ mg L}^{-1}$, le DOP est la forme dominante avec plus de 40% et la forme TPP ne représente plus que $< 50\%$ du TP. Parallèlement à ces résultats, la distribution des précipitations se révèle assez régulière en 1995 mais une période de sécheresse interrompue par une pluie importante au moment de l'échantillonnage vient caractériser l'année 1994. Ces observations suggèrent donc que l'écoulement préférentiel dans les sols argileux est une source non négligeable de contamination des cours d'eau en P lorsque les conditions pluviométriques sont propices à induire le fendillement. Sous des régimes d'humidité plus favorables, la concentration en TP des eaux de drainage de la majorité des sols reste en-deçà de la norme.

Lorsque l'écoulement préférentiel semble être le principal mécanisme responsable des pertes en P vers les drains, il est difficile de prédire les concentrations en TP de l'eau de drainage à partir des propriétés du sol de surface. Toutefois, les concentrations en TP sont reliées à la teneur en P dans la couche arable lorsque ce facteur est négligeable. Ainsi, pour les sols à substratum calcaire, la teneur en M3P ou P_w explique 70% de la variation de TP en 1995. Jusqu'à 82% de la variance de TP est expliqué par l'indice de saturation ($Pi_{ox}/(Fe_{ox}+Al_{ox})$) couplé à la teneur en P_w de l'horizon A. De même, en regroupant les sites argileux, la teneur en Pi_{ox} et le contenu en sable de la couche de surface 0-5 cm expliquent 66% de la variation de TP. La teneur en Pi_o de cette même couche explique, à elle seule, 44% de la variance de TP dans les sols argileux. L'absence de variation significative des concentrations en DOP entre les deux années d'échantillonnage suggère qu'il existe un lessivage de base en P attribuable surtout à la forme organique. Cependant, le niveau de contamination en P de l'eau de drainage en absence d'écoulement préférentiel devient problématique seulement lorsque les sols présentent des teneurs excessives en P. Pour les sols à substratum calcaire, ce seuil est fixé à $110 \text{ mg M3P kg}^{-1}$, ce qui équivaut à la classe de fertilité "excessivement riche" reconnue pour les cultures de maïs et soya. Or, 33% des sites échantillonnés ont déjà atteint ce niveau d'enrichissement. Bien que le seuil critique doive être défini pour les autres types de sol, cet état de fait indique clairement l'urgent besoin de fixer des seuils maximums d'enrichissement en P dans les sols agricoles afin de limiter à long terme la dégradation des cours d'eau.

Finalement, la présente étude met en évidence le besoin de rectifier la croyance générale sur le caractère typiquement immobile du P dans la plupart des sols minéraux. Dans les sols recevant de façon répétitive d'importants apports de fumure organique, l'accumulation notable de formes labiles et organiques, par rapport aux sols forestiers de même nature, favorise la migration du P en profondeur et accroît le risque de lessivage dans les eaux souterraines. Dans les sols relativement plats, drainés souterrainement et intensivement cultivés, les pertes en P dans les eaux de drainage peuvent contribuer significativement à l'eutrophisation des cours d'eau lorsque les sols présentent des teneurs excessives. Les sols argileux représentent un risque supplémentaire pour l'environnement en raison de leur vulnérabilité au fendillement lors de période de sécheresse. Afin d'évaluer l'importance relative du lessivage en P par rapport au ruissellement, sa contribution à la contamination des eaux de surface reste à être déterminée en termes de charge polluante pour chacun des deux agro-écosystèmes.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	v
Avant-propos.....	vii
Résumé.....	ix
Table des matières.....	xi
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des figures.....	xiv
Liste des abréviations.....	xv

SYNTHÈSE:

1. INTRODUCTION.....	1
2. REVUE DE LITTÉRATURE ET DÉFINITION DU PROJET DE RECHERCHE.....	3
2.1 Accumulation du P dans les sols fertilisés.....	3
2.1.1 Fertilisation principalement minérale.....	3
2.1.2 Fertilisation principalement organique.....	4
2.1.3 Capacité de sorption des sols.....	7
2.2 Accumulation du P et qualité des eaux.....	7
2.2.1 Mécanismes de transport du P.....	7
2.2.2 Pratiques agricoles et teneur en P des eaux ruisselées.....	8
2.2.3 Pratiques agricoles et teneur en P des eaux de drainage.....	9
2.3 Notion de saturation des sols en P.....	10
2.3.1 Définition du point de saturation.....	10
2.3.2 Vulnérabilité d'un sol à la saturation.....	10
2.3.3 Estimation des quantités de P requis pour saturer un sol.....	10
2.3.4 Indicateurs potentiels du risque de lessivage du P.....	12
2.4 Projet de recherche et hypothèse de travail.....	14
3. CINÉTIQUE DE SORPTION ET DE DÉSORPTION DU PHOSPHORE.....	17
3.1 Introduction.....	17
3.2 Matériel et Méthodes.....	17
3.2.1 Choix des sols.....	17
3.2.2 Essais de lessivage en colonnes de sol.....	18
3.2.3 Paramètres étudiés.....	18
3.2.4 Analyse statistique.....	19
3.3 Résultats.....	19
3.3.1 Caractérisation des sols.....	19
3.3.2 Courbes de fuite.....	19
3.3.3 Capacité de sorption et de désorption des sols.....	19
3.4 Discussion.....	22
3.5 Conclusion.....	23

4. COMPARAISON DES SOLS DE LA BEAURIVAGE ET DE ST-HYACINTHE.....	25
4.1 Introduction.....	25
4.2 Portrait agricole des deux régions.....	25
4.3 Teneur en P des horizons A.....	26
4.4 Teneur en P des horizons inférieurs.....	31
4.5 Conclusion.....	33
5. FORMES ET CONCENTRATIONS EN P DE L'EAU DE DRAINAGE DANS LA RÉGION DE ST-HYACINTHE.....	35
5.1 Introduction.....	35
5.2 Matériel et Méthodes.....	35
5.2.1 Caractérisation des sols.....	35
5.2.2 Caractérisation des eaux de drainage.....	36
5.2.3 Analyse statistique.....	36
5.3 Résultats.....	39
5.3.1 Concentration en P total des eaux de drainage.....	39
5.3.2 Formes de P dans les eaux de drainage.....	39
5.3.3 Prédications de la concentration en P de l'eau de drainage.....	41
5.3.3.1 Sols à substratum calcaire.....	42
5.3.3.2 Sites argileux exception faite de la série Providence.....	44
5.4 Discussion.....	45
5.4.1 Écoulement préférentiel.....	45
5.4.2 Lessivage de base.....	46
5.4.3 Limite d'enrichissement.....	47
5.5 Conclusion.....	48
6. CONCLUSION GÉNÉRALE.....	49
7. BIBLIOGRAPHIE.....	53

ARTICLES:

ARTICLE 1: P Sorption/Desorption Kinetics of Soil under Contrasting Land Uses.....	59
ARTICLE 2: Forms and Concentrations of P in Drainage Water of Tile-Drained Soils in the St-Lawrence Lowlands.....	87
ARTICLE 3: Prediction of Drainage Water P Concentrations from Surface Soil Properties.....	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Estimation de la quantité potentielle de P en surplus apporté aux sols cultivés en maïs-ensilage.....	12
Tableau 2.2: Indicateurs potentiels du risque de lessivage retenus dans cette étude.....	15
Tableau 3.1: Résumé de quelques propriétés des sols étudiés et résultats des essais de sorption et de désorption.....	20
Tableau 4.1: Classification des séries de sols étudiées et propriétés physico-chimiques moyennes de leur horizon A.....	27
Tableau 4.2: Teneurs moyennes en P, indice moyen de sorption et indice moyen de saturation en P des horizons A des séries étudiées.....	28
Tableau 4.3: Proportion des échantillons de sol prélevés dans diverses municipalités du bassin de la rivière Beaurivage et associée à chacune des classes de fertilité.	29
Tableau 5.1: Méthodes utilisées pour caractériser différentes formes de P dans les sols..	37
Tableau 5.2: Méthodes utilisées pour la caractérisation générale des sols.....	37
Tableau 5.3: Nombre de sites présentant des concentrations en TP dans l'eau de drainage supérieures à la norme de 0,03 mg L ⁻¹	39
Tableau 5.4: Équations de régression prédisant la concentration en TP de l'eau de drainage de 1995 à partir de certaines propriétés des sols cultivés.....	42