

**Classification des terres agricoles  
selon leurs aptitudes physiques à recevoir  
des engrais de ferme à l'aide  
d'un système expert**

**Rapport de recherche no. 374, Volume 4**

# **MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION ET CHOIX STRATÉGIQUES DANS LA GESTION DES SURPLUS DE FUMIERS ET LISIERS**

**Éditeurs : Jean-Louis Sasseville et Jean Nolet**

**Rapport rédigé pour  
Ministère de l'Environnement et de la Faune**

**Volume 4**

**Classification des terres agricoles selon leurs aptitudes  
physiques à recevoir des engrais de ferme à l'aide d'un  
système expert**

**Auteurs : Suzanne Lavoie, Michel C. Nolin, Jean-Louis Sasseville**

**Rapport de recherche (no. 374)**

**INRS - Eau, Université du Québec  
et  
Consultants BPR**

**Novembre 1994**

**Équipe de recherche :**

**Jean Louis Sasseville (coordonnateur et directeur scientifique), Camil Dutil (responsable, Consultants BPR), Olivier Banton (professeur, INRS-Eau), Jean-Yves Drolet (Consultants BPR), Jean Nolet (Chargé de projet, INRS-Eau), Gilles Gagné (chargé de projet, Consultants BPR), Jean-Pierre Dutil (Consultants BPR), Suzanne Lavoie (Étudiante de M. Sc. INRS-Eau)**

## **REMERCIEMENTS**

Ce volume consiste presque intégralement en ma thèse de maîtrise et je dois remercier pour leurs commentaires et leur support, mon directeur de thèse Jean-Louis Sasseville et Michel C. Nolin, du Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques (CRTRB) d'Agriculture et Agro-alimentaire Canada. Celui-ci a agi en tant que codirecteur de ce projet de recherche ainsi que Richard Marceau de l'École nationale d'administration publique (ENAP) que je remercie également pour nos discussions enrichissantes portant sur les questions de politiques environnementales et d'économie du secteur public. Ce projet n'aurait pu se réaliser sans l'aide du CRTRB de Sainte-Foy qui m'a permis l'accès à leur base de données et l'utilisation de leurs équipements.

## RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail était d'intégrer le facteur "sol" dans l'évaluation de la capacité de réception d'un territoire donné face aux activités d'épandage d'engrais de ferme. Dans les premiers chapitres, l'importance du facteur "sol" dans la définition de la capacité de réception a été démontrée. En effet, le mouvement de l'eau sur et dans les sols gouverne les pertes d'éléments vers les eaux souterraines et de surface, pertes dont l'ampleur dépend de plusieurs processus physiques et biochimiques. La texture et la stratigraphie des sols commandent ce mouvement de l'eau d'où le choix, dans ce volume, d'évaluer indirectement la capacité de réception des sols à partir des séries de sols. La disponibilité des données pédologiques sous forme de rapports et de cartes a également motivé ce choix. L'approche système expert a été retenue en raison de sa flexibilité et de la précision des données disponibles. Le système expert a été développé à l'aide du logiciel ALES spécifiquement conçu pour l'évaluation des terres selon le cadre proposé par la FAO.

Selon la méthode d'évaluation proposée, la définition de la capacité de réception consiste à une évaluation environnementale en deux composantes. La première estime le potentiel de recyclage des éléments nutritifs épandus par les cultures à partir de l'aptitude des sols à supporter la production d'une culture donnée. Ainsi, l'estimation des rendements potentiels a permis de déduire la quantité d'éléments (NPK kg/ha) potentiellement prélevés par le maïs. La deuxième composante s'appuie sur l'évaluation des risques de pertes à l'environnement des éléments nutritifs contenus dans les engrais de ferme. Parmi, les critères diagnostiques utilisés, l'évaluation des risques de ruissellement et d'érosion hydrique et des risques de lessivage définissent le mieux les risques environnementaux. L'approche utilisée permet également d'évaluer différents scénarios d'épandage et leurs impacts sur la capacité de réception, par la définition de types d'utilisation des terres. Quatorze unités cartographiques du sud-est de la plaine de Montréal ont été classifiées en fonction de cette capacité sur la base des qualités permanentes et des caractéristiques des terres.

Le système expert permet une estimation rapide de la capacité de réception d'un territoire face aux activités d'épandage de lisier de porc. Il ressort de cette étude que le système développé s'avère un outil intéressant d'aide à la prise de décision. Il permet la prise en compte des disparités régionales, facteur important d'équité et d'efficacité dans l'élaboration et l'application de politiques tant environnementales qu'agricoles. Aussi, le choix d'un mécanisme de contrôle et son applicabilité sur le terrain peuvent être vérifiés rapidement. Le système permet également une analyse économique de différents scénarios d'épandage et des mécanismes de contrôle.

## AVANT-PROPOS

Un peu partout dans le monde, on a constaté les effets nocifs des régimes intensifs de production agricoles sur la santé humaine et la qualité de l'environnement : la contamination des eaux de surface et des eaux souterraines par les fertilisants et les biocides, la pollution atmosphérique, l'infestation par des bactéries pathogènes des sols et des cours d'eau et la dégradation de la qualité des sols en sont des exemples frappants. Mais les effets pervers de certaines pratiques agricoles ne se limitent pas à ce type de dommages sociaux. Elles entament le potentiel futur des sols arables en favorisant l'érosion, la compaction, la surfertilisation ou encore l'acidification des sols, créant ainsi des dommages irréversibles ou extrêmement coûteux à restaurer.<sup>1,2</sup>

Malheureusement, le problème s'accroît toujours. Des recherches récentes ont montré, qu'aux États-Unis, la pollution diffuse est la cause principale de la pollution de l'eau et que l'agriculture en est la plus importante composante. Ces recherches montrent aussi que la contamination des nappes phréatiques constitue un problème environnemental majeur : l'accumulation chronique des nitrates, par exemple, jusqu'à des niveaux qui compromettent l'utilisation économique des eaux souterraines, accentuera considérablement la rareté de la ressource eau dans l'avenir.<sup>3,4</sup>

Ces problèmes mettent en perspective les relations de causalités et de réciprocity entre l'agriculture et l'environnement. On a en effet constaté que « l'agriculture était maintenant parvenue à un stade où il était possible de donner aux exploitations une rentabilité à court terme qui dispense de sauvegarder la relation d'harmonie et d'interdépendance entre l'agriculture et l'environnement »<sup>5</sup> et que ce désintéressement pour la sauvegarde du milieu de vie engendrait des problèmes qui, dans plusieurs cas, sont quasi-irréversibles. Ainsi, depuis le début des années 80, le monde agricole et la société en général sont passés d'une vision restreinte de la production agricole à une vision plus large, qui intègre des préoccupations environnementales. Aujourd'hui, les ressources naturelles ne sont plus simplement considérées en fonction de leur valeur comme intrants à la production agricole, mais aussi, à l'inverse, en fonction de l'impact de la production agricole sur leur dégradation.

Cette prise de conscience des problèmes environnementaux liés à l'agriculture a engendré des changements d'attitude chez la population qui devient progressivement moins tolérante face aux agressions que fait subir l'agriculture à son environnement. C'est ainsi que des

---

<sup>1</sup> OCDE. *Politiques de l'agriculture et de l'environnement: Possibilités d'intégration*. Paris: 1989.

<sup>2</sup> Tabi et al. *Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec*. 1990.

<sup>3</sup> Duda, A. M. et R. J. Johnson. "Cost Effective Targeting of Agricultural Nonpoint-Source Pollution Controls." *Journal of Soil and Water Conservation*. 1985.

<sup>4</sup> Spofford, W. O. et al. "Sources of Uncertainty in Economic Analyses of Management Strategies for Controlling Groundwater Contamination." *American Journal of Agricultural Economics*. 1986: pp. 1234-1239.

<sup>5</sup> MAPAQ. *Vers une politique de développement durable du secteur bioalimentaire*. Québec: Document de consultation; 1993 Nov.

entreprises agricoles ont de plus en plus de difficultés à s'implanter ou à se développer étant donné les répercussions que peuvent avoir leurs activités sur la qualité du milieu ambiant à cause des odeurs, de la pollution de l'eau, du bruit causé par certains équipements ou de la poussière et des produits chimiques toxiques transportés par le vent.

Au Québec, cette désapprobation populaire trouve son écho au niveau politique notamment lorsque « plusieurs corporations municipales établissent des règlements restreignant l'activité agricole »<sup>6</sup> ou encore, dans les politiques d'aide mises de l'avant par le ministère de l'Environnement et de la Faune et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. L'intérêt public général, le souci d'équité, la place des générations futures, l'incapacité du marché à prendre en compte les facteurs environnementaux dans le processus de production et la nécessité de venir en aide aux producteurs sont les principaux facteurs qui ont justifié à ce jour l'intervention de l'État dans le contrôle de la pollution de l'eau.

Les producteurs et intervenants du secteur agro-alimentaire sont pour leur part conscients des problèmes engendrés par les productions animales : la déclaration des partenaires du secteur agro-alimentaire, lors du sommet de l'agriculture québécoise, qui fait de la conquête des marchés l'objectif des prochaines années précise en effet « que cette conquête doit se faire dans le respect des ressources » ... « ceci signifie entre autres qu'il faut garder à l'esprit ... que la qualité de l'eau constituera au cours des prochaines années un avantage comparatif de plus en plus important pour le secteur bioalimentaire, puisque l'irrigation des cultures, l'abreuvement des animaux et l'aquiculture sont impensables avec de l'eau contaminée »<sup>7</sup>.

Parmi les activités agricoles qui préoccupent le plus les autorités gouvernementales québécoises, on retrouve l'élevage intensif d'animaux. En effet, on produit annuellement au Québec plus de 32 millions de m<sup>3</sup> de déjections animales annuelles dont il faut disposer d'une façon sécuritaire, ceci aux coûts les plus faibles<sup>8</sup>. Quelle est la nature sociale et économique du problème posé par les élevages intensifs? Comment y faire face? Quelles solutions lui apportées?

Voilà l'objet de la présente recherche : fournir aux décideurs publics un cadre conceptuel pour l'élaboration d'une politique de contrôle de la pollution issue de la manutention des effluents d'élevage ainsi qu'un outil d'aide à la prise de décisions favorisant leur gestion optimale. Il se subdivise en cinq activités principales :

*L'analyse des tendances à l'industrialisation* permet d'inscrire la valorisation technologique des effluents d'élevage et les politiques de contrôle de la pollution agricole dans leur contexte et de vérifier si l'industrialisation des pratiques favorisent ou non le contrôle de la pollution d'origine agricole.

---

<sup>6</sup> *Idem*

<sup>7</sup> *Idem, note 6*

<sup>8</sup> *MAPAQ. Vers une politique de développement durable du secteur bioalimentaire. Québec: Document de consultation; 1993 Nov.*

*Le cadre conceptuel du contrôle* où les concepts nécessaires pour appréhender les divers aspects du problème de réduction des pollutions issues des surplus de fumiers et lisiers seront expliqués et traduits en stratégies de contrôle.

*L'établissement des contraintes environnementales et leur transposition à la politique de contrôle* selon deux méthodes : par l'établissement de relations doses-réponses à l'aide de modèles de processus et par la classification des terres agricoles selon aptitudes physiques à supporter de façon viable les activités d'épandage.

*L'analyse des différentes technologies et modes de gestion des lisiers* disponibles à l'aide d'une grille d'analyse qui établit des critères de faisabilité économique, environnementale, agronomique et sociale.

*La formulation de deux hypothèses de contrôle de la pollution* issue de la gestion des fumiers et leur évaluation (simulation) sur la base de leur faisabilité économique, environnementale, agronomique et technologique.

*L'analyse des diverses options* qui s'offrent au gouvernement en terme de contrôle de la pollution agricole et de gestion des effluents d'élevage en tenant compte de leur efficacité et de leur impact sur l'équité.

Ce grand projet méthodologique sur l'élaboration de politiques de contrôle de la pollution d'origine agricole a donné lieu à sept rapports de recherche :

### **Volume 1. Tendances à l'industrialisation dans les principales productions animales au Québec et augmentation des capacités de contrôle de la pollution**

Ce rapport trace un portrait des principaux secteurs de production animale, soit le lait, le porc, le bovin et la volaille. On y évalue la place que chacun de ces secteurs occupera dans le paysage rural québécois dans l'avenir. On y discute du problème de gestion des fumiers et des lisiers et des tendances à son accentuation, cela sur la base de l'évolution probable de chacun de ces secteurs, établie en considérant les tendances à la libéralisation des marchés constatés actuellement au niveau international. Dans cette perspective, les implications du projet Dunkel sont mises en évidence. On y constate que les productions québécoises très protégées ou subventionnées telles le lait, le bovin et l'avicole risque de souffrir des réductions à moyen terme. Seule la production porcine, la plus dommageable pour l'environnement, voit ses perspectives améliorées. Une accentuation des problèmes environnementaux résultant de la gestion inadéquate des fumiers serait donc à craindre si les politiques environnementales actuellement en vigueur ne sont pas améliorées. Ce rapport met l'accent sur le fait que l'industrialisation et la concentration dans le secteur porcin à la source du problème environnemental actuel sont aussi des facteurs susceptibles de contribuer à sa solution, notamment par la valorisation technologique des fumiers et des lisiers.

### **Volume 2. Cadre théorique pour le contrôle de la pollution en provenance des principales productions animales**

Dans ce rapport, trois théories ont été utilisées pour comprendre la structure et la dynamique socio-économique de la production de la pollution agricole. La *théorie*



*économique néoclassique* qui décrit la pollution de l'eau comme originant de trois sources de demande conflictuelles sur le marché de l'utilisation de l'eau. La demande pour l'eau à des fins de consommation et la demande pour l'eau à des fins de loisirs sont incompatibles avec la demande pour l'eau comme lieu de déversement des déchets lorsque ce dernier usage est poussé trop loin. Ce déséquilibre entre l'offre et la demande pour l'eau est présenté comme résultant de l'absence de droits de propriété bien définis pour cette ressource. Selon la perspective néo-classique, différents instruments sont susceptibles de permettre le contrôle efficace de la pollution : les plus étudiés sont les redevances, les subventions à la dépollution et les permis d'émission négociables parce que, dit-on, ils tiennent compte du fait que le coût marginal de dépollution est croissant, que les coûts de contrôle varient entre les firmes et que différentes technologies sont utilisables pour réduire la pollution. La *théorie du choix public* permet de comprendre les difficultés que l'on rencontre dans la réalité lorsque l'on cherche à mettre en place une politique de contrôle utilisant l'un ou l'autre de ces instruments : la logique du positionnement politique et stratégique des divers intervenants s'explique par la recherche de la maximisation de leur intérêt égocentrique. C'est ainsi que s'explique que le politicien, l'entrepreneur, le producteur agricole et le bureaucrate favorisent la subvention comme mode d'intervention, engendrant ainsi un déséquilibre entre le support apporté à la subvention et celui apporté à la taxe, qui elle n'est défendue que par les consommateurs et les contribuables. De son côté, la *théorie de l'approche conciliatoire*, sur la base des modes explicatifs de la théorie économique, propose une façon de réaliser les choix où chacun des intervenants, conscient des objectifs et des contraintes des autres intervenants, reconnaît la légitimité de la position de l'autre dans l'optique de trouver un compromis bénéfique, tant à la société qu'à eux-mêmes. Il ressort des différents arguments en faveur et contre les instruments économiques présentés dans le cadre théorique que, bien que plus critiquée en ce qui a trait à l'efficacité, la subvention apparaît plus aisément applicable. Un problème commun à la fois aux redevances, aux subventions et aux permis d'émission négociables est cependant mis en évidence, il s'agit du problème associé à la mesure de la pollution de chacun des producteurs agricoles. Ce problème est d'une importance capitale si des incitatifs économiques efficaces doivent être mis en oeuvre dans le but de contrôler la pollution. Comme la science est incapable de fournir un instrument simple pour mesurer la pollution d'origine diffuse, il est suggéré, ici, de contourner le problème en basant la mise en oeuvre d'une politique environnementale non pas sur la quantité de polluants retrouvée dans l'eau, mais sur le respect de la capacité-support du sol qui elle détermine le niveau de la pollution. Si la "vérité sur la capacité support" est plus facilement mesurable que la pollution de chacun des producteurs, une avenue intéressante s'offre ici à l'agence de contrôle.

### **Volume 3. Méthode de détermination des droits de pollution : formulation des relations dose-réponse**

Ce rapport tente de vérifier si le niveau des connaissances scientifiques sur la propagation de la pollution dans les sols et dans l'eau est suffisant pour permettre l'application efficace d'instruments économiques. Partant de l'hypothèse que la meilleure manière de disposer les lisiers est l'épandage, on cherche à y montrer qu'il est possible, sur la base d'une convention entre les intervenants, de traiter le problème du contrôle de la pollution en établissant la contribution *potentielle* d'un producteur à la pollution d'un cours d'eau. On pourrait ainsi taxer ou subventionner selon la contribution de chacun à la détérioration ou à l'amélioration de la qualité de l'eau. La méthode choisie pour y parvenir est la modélisation des apports

subordonnés au concept « *doses épandues-réponse en apport de polluant au cours d'eau* ». Après avoir caractérisé les fertilisants organiques et le cycle des substances nutritives, on y traite des avantages et des inconvénients des fumiers et lisiers au moment de l'épandage, de l'évaluation des apports au cours d'eau en substances altérables, des besoins et de la disponibilité en nutriments, des caractéristiques des sols contrôlant le transport et la transformation des nutriments, et enfin des conditions climatiques et de drainage des sols influençant les transformations et les charges des substances polluantes. Finalement, en dernière étape, on y procède à l'établissement des relations « doses-réponses » à l'aide des logiciels AGRIFLUX et FÉCES, ceci permettant de démontrer qu'il est possible d'établir la capacité-support d'une parcelle de sols sur la base d'un nombre restreint de paramètres.

#### **Volume 4. Aptitudes physiques des sols agricoles à recevoir des engrais de ferme : classification à l'aide d'un système expert**

Ce rapport explore la possibilité d'attribuer une valeur à la capacité support des terres agricoles en regard des productions porcines à partir des données pédologiques disponibles et des connaissances actuelles sur les impacts de l'épandage du lisier de porc. Un premier objectif vise l'intégration du facteur sol dans l'estimation des superficies disponibles pour l'épandage sécuritaire des engrais de ferme. Un deuxième objectif analyse la pertinence d'un système expert comme outil d'aide à la prise de décision. Dans un premier temps, sont identifiés les facteurs intrinsèques du sol affectant le transport des éléments potentiellement polluants vers les eaux de surface et souterraines. Ceci permet de dégager les qualités de sols nécessaires à l'épandage sécuritaire. Ensuite la méthode d'évaluation des terres proposée par la FAO (1976) a été adaptée pour classer les séries de sols selon leurs aptitudes physiques à recevoir des lisiers de porcs. Cette méthode d'évaluation permet de tenir compte des disparités régionales, tant physiques que sociales, en estimant les superficies disponibles pour l'épandage selon des critères spécifiques à une région par exemple, la protection des eaux de surface ou la protection des aquifères pour une autre. En effet, les problèmes de pollution sont souvent locaux et varient selon les régions tant au niveau des activités humaines (utilisation du territoire) que de leur environnement physique distinct (hydrologie, géologie, climat, pédologie, etc.). Le système expert, développé pour l'interprétation des données pédologiques, permet d'identifier rapidement les facteurs physiques limitant et de classer les sols en fonction de critères spécifiques et des mesures préventives ou correctives apportées par le producteur agricole en vue de minimiser les pertes à l'environnement.

#### **Volume 5. L'évaluation des technologies de gestion du lisier de porcs dans le cadre de l'établissement d'une politique de contrôle de la pollution provenant des productions animales**

Le développement d'une politique de contrôle de la pollution originant des productions animales doit prendre en considération, non seulement les mesures administratives pouvant être apportées aux méthodes actuelles de gestion des fumiers ou lisiers, mais le potentiel technologique permettant l'amélioration des systèmes de production. Plusieurs novations technologiques sont potentiellement applicables pour modifier la chaîne actuelle de gestion dans le cadre de la production d'effluents d'élevage et, plus particulièrement, dans le cas des élevages porcins. Ces technologies ont cependant des incidences agronomiques, zootechniques, environnementales, économiques, sociales ou politiques. Ce rapport

présente une analyse des technologies disponibles en insistant sur leurs implications éventuelles dans la gestion des surplus de lisiers en régions de concentration. Pour bien situer le lecteur, on retrouve d'abord une description des caractéristiques du lisier de porcs selon la chaîne de gestion standard québécoise et des contraintes actuelles à sa valorisation agricole. Un inventaire des technologies d'utilisation et de traitement est ensuite effectué. Les technologies ont été classées en familles selon que la technologie s'applique à l'échelle de l'entreprise agricole ou régionalement et que le ou les types de produits obtenus sont liquides, liquides et solides, ou solides. Une pré-sélection a été effectuée selon des critères pratiques et les technologies retenues ont fait l'objet d'une analyse à l'aide d'une grille qui tient compte de facteurs agronomiques, environnementaux, économiques et sociaux. Les principales différenciations obtenues sont discutées pour justifier les résultats obtenus. Enfin, les technologies prometteuses sont évaluées selon leurs influences probables, positives ou négatives, sur la capacité-support des régions qui présentent des conditions de surplus, en tenant compte de critères agronomiques, environnementaux et sociaux. Finalement, on discute des principaux résultats obtenus et leurs implications socio-politiques pour soutenir les choix technologiques, tout en tentant de mettre en évidence les avenues technologiques les plus prometteuses pour résoudre les problèmes de pollution causés par les surplus de lisier de porcs dans certaines régions du Québec.

#### **Volume 6. De la théorie à l'application d'une politique environnementale visant la gestion des fumiers**

Ce rapport présente une démarche pour la formulation d'une politique efficace visant le contrôle de la pollution de l'eau engendrée par les effluents d'élevage. On y aborde d'abord la question de l'intégration des politiques agricoles et environnementales. Il s'agit : 1) d'améliorer les politiques agricoles qui vont à l'encontre des objectifs environnementaux; 2) de susciter l'internalisation par les producteurs des coûts des dommages environnementaux; 3) de cibler les objectifs compatibles; 4) de favoriser l'éducation des producteurs et la promotion des bonnes pratiques; 5) de favoriser la concertation entre les divers intervenants. Subséquemment, après avoir mis en évidence les efforts pour développer une agriculture durable, deux avenues favorisant l'intégration des politiques environnementales et agricoles ont été identifiées : le « découplage » qui implique de ne pas lier le soutien du revenu à une production précise et le soutien conditionnel qui implique de ne soutenir que les producteurs qui respectent les règlements environnementaux. On expose par la suite différentes expériences pour contrôler la pollution à l'aide des instruments économiques qui obligent les producteurs à internaliser les coûts des dommages.

Par la suite, d'une part, on met en évidence les facteurs institutionnels et socio-économiques dont il faut tenir compte dans l'élaboration de la politique, et d'autre part, on dégage les obstacles et difficultés en se basant sur des expériences concrètes de politiques de contrôle de la pollution mises en oeuvre dans des pays où des problèmes similaires au problème québécois sont rencontrés. Ainsi, l'analyse des réglementations québécoises et de l'expérience internationale permet la formulation de quelques recommandations en vue de rendre la politique québécoise actuelle plus efficace.

Il faut cependant viser la mise en forme d'une politique de contrôle plus efficace. Partant du fait que les connaissances scientifiques actuelles permettent d'établir d'une façon satisfaisante la relation entre l'épandage d'une certaine quantité de lisier sur le sol et la

quantité de nutriments qui se rend au cours d'eau, on y traite des notions de capacité support du sol en regard des productions animales comme assise de la politique. On y établit que la méthode pour calculer la capacité support du sol (ou capacité de production animale en fonction de la capacité de disposer adéquatement des effluents d'élevage) devrait faire l'objet d'une entente entre les principaux intervenants touchés par le contrôle de la pollution agricole. On y propose une politique de contrôle de la pollution par les effluents d'élevage novatrice, réaliste et efficace qui prend en considération le conflit entre la productivité de la ferme et la qualité de l'eau.

La politique proposée utilise en partie la réglementation existante. Elle comporte les éléments suivants : 1) la *prohibition d'épandage*, la définition de *lieux d'épandage autorisés* et de *certificat d'autorisation*, 2) des normes générales minimales, la définition de périodes d'épandage sécuritaires, l'élaboration en conciliation de méthode pour établir des *normes régionales*, 3) un *concept d'autogestion* central à la politique, 4) la mise en place de tables de *conciliation entre les intervenants* (pollueurs - pollués - autorités de contrôle), 5) la notion de capacité support régionale des sols, 6) la définition de « capacités de réception » et de « droits d'épandage », 7) la définition des modes transactionnels, 8) le contingentement du coût d'acquisition des droits, 9) l'impartition des coûts dans les transactions, 10) l'incitation au plan de fertilisation, 11) l'application des redevances, 12) le mode de suivi juridico-administratif, 13) les incitations monétaires: a) le soutien conditionnel, destiné à contrer l'incertitude, et b) l'aide de transition, destinée au développement du marché des engrais de ferme et à la déconcentration industrielle des producteurs, 14) la mise sur pied d'incitations à l'investissement en recherche et développement et démonstration. Quoique sommaire, l'évaluation de la politique montre son intérêt pour contrôler efficacement la pollution d'origine diffuse. Son originalité réside dans l'établissement d'un marché contingenté de droits d'épandage et d'une amorce économique pour la valorisation agricole des engrais de ferme.

#### **Volume 7. Choix stratégiques dans la gestion des surplus de fumiers et lisiers : synthèse générale et résumé.**

Ce rapport constitue la synthèse du projet « **MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION ET CHOIX STRATÉGIQUES DANS LA GESTION DES SURPLUS DE FUMIERS ET LISIERS** » dont l'objectif était de formuler des propositions qui permettraient au gouvernement un contrôle plus efficace de la pollution de l'eau engendrée par les effluents d'élevage. Outre un résumé général de l'étude, on y présente le contexte politique et socio-économique du contrôle de la pollution agricole en insistant sur l'interaction entre la pollution et la surproduction agricole, toutes deux étant les conséquences d'une dynamique de production qui est perpétuée par les politiques agricoles.



## TABLE DES MATIÈRES

<b>Remerciements</b> .....	<b>iii</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>v</b>
<b>Avant-propos</b> .....	<b>vii</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>xv</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>xix</b>
<b>Liste des annexes</b> .....	<b>xxi</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Pollution agricole provenant des productions animales : causes et processus</b> ...	<b>7</b>
1.1 Pollution de l'air par volatilisation de l'azote .....	8
1.2 Pollution des eaux de surface .....	10
1.3 Pollution des eaux souterraines .....	12
1.4 Dégradation des sols agricoles .....	14
1.5 Synthèse .....	14
<b>2. Rationalisation des épandages comme moyen de contrôle de la pollution</b> .....	<b>19</b>
2.1 L'utilisation des engrais de ferme comme fertilisants .....	21
2.2 Azote: contribution du sol et apport des engrais de ferme .....	22
2.3 Phosphore: contribution du sol et apport par les engrais de ferme .....	23
2.4 Potassium: contribution du sol et apport par les engrais de ferme .....	24
<b>3. Évaluation de la capacité de réception des terres agricoles</b> .....	<b>29</b>
3.1 L'approche mathématique .....	30
3.1.1 Systèmes paramétriques .....	30
3.2 L'approche déductive .....	32
3.2.1 Système canadien d'inventaire des terres (ITC) .....	34
3.2.2 Cadre d'évaluation proposé par la FAO .....	34
3.2.3 Le système-expert .....	36
3.2.4 L'outil informatique ALES .....	36
3.3 Élaboration d'un modèle d'évaluation .....	39
3.4 Synthèse .....	39

<b>4. Méthodologie</b> .....	<b>45</b>
4.1 Région à l'étude .....	45
4.2 Types d'utilisation des terres retenus .....	48
4.2.1 La production de maïs-grain: exigences et potentiel de recyclage .....	48
4.2.2 Utilisation du lisier de porc comme fertilisant .....	50
4.3 Validation du modèle d'évaluation .....	51
<b>5. Méthodologie de classification des sols agricoles selon leurs aptitudes physiques à recevoir des engrais de ferme</b> .....	<b>55</b>
5.1 Potentiel de recyclage par la culture .....	56
5.1.1 Aptitude à produire le maïs-grain .....	56
5.1.2 Productivité potentielle et estimation des rendements .....	57
5.1.3 L'évaluation du potentiel de recyclage .....	59
5.2 Risques de pertes à l'environnement .....	59
5.2.1 Vulnérabilité à la volatilisation .....	60
5.2.2 Vulnérabilité au ruissellement .....	60
5.2.3 Vulnérabilité au lessivage .....	62
5.3 Risques de déséquilibre nutritif .....	62
5.3.1 Risque de déséquilibre nutritif en azote .....	63
5.3.2 Déséquilibre nutritif en phosphore .....	64
5.3.3 Déséquilibre nutritif en potassium .....	65
5.4 Classification des sols selon leur capacité de réception .....	65
<b>6. Résultats et discussion</b> .....	<b>69</b>
6.1 Déduction de caractéristiques secondaires .....	69
6.2 Potentiel de recyclage par le maïs .....	70
6.2.1 Rendements potentiels en maïs et prélèvements en NPK .....	71
6.3 Risques de pertes à l'environnement .....	72
6.3.1 Vulnérabilité à la volatilisation .....	73
6.3.2 Vulnérabilité au ruissellement .....	73
6.3.3 Vulnérabilité au lessivage .....	74
6.4 Risques de déséquilibre nutritif .....	77
6.5 Classification globale .....	77
<b>7. Utilisation du système expert</b> .....	<b>83</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>91</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>95</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>107</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Facteurs influençant la volatilisation de l'azote .....	9
Tableau 2.	Facteurs influençant le ruissellement et l'érosion hydrique .....	12
Tableau 3.	Facteurs influençant le lessivage .....	13
Tableau 4.	Facteurs affectant les processus de pertes d'éléments nutritifs .....	15
Tableau 5.	Efficacité fertilisante du lisier de porc .....	22
Tableau 6.	Facteurs influençant la capacité des sols de retenir le phosphore .....	24
Tableau 7.	Clé d'interprétation pour la production de maïs, Comté de Cheshire .....	31
Tableau 8.	Clé d'interprétation pour l'épandage d'engrais de ferme .....	31
Tableau 9.	Clé d'interprétation pour l'épandage de boues .....	33
Tableau 10.	Clé d'interprétation pour l'installation de champs d'épuration .....	33
Tableau 11.	Classification proposée par la FAO .....	35
Tableau 12.	Importance des activités agricoles du sud-est de la plaine de Montréal ...	46
Tableau 13.	Données climatiques saisonnières du sud-est de Montréal .....	47
Tableau 14.	Caractéristiques des sols de la plaine de Montréal .....	47
Tableau 15.	Recommandations en P et K pour le maïs-grain .....	49
Tableau 16.	Apports en NPK selon le mode et la période d'épandage .....	51
Tableau 17.	Productivité proportionnelle des sols pour le maïs .....	58
Tableau 18.	Données pour l'estimation des prélèvements en NPK .....	59
Tableau 19.	Risque de perte d'azote par volatilisation .....	60
Tableau 20.	Vulnérabilité à l'érosion hydrique .....	61
Tableau 21.	Risque de perte par ruissellement .....	61
Tableau 22.	Risque de lessivage selon la période d'épandage .....	62
Tableau 23.	Contribution potentielle du sol en azote .....	63
Tableau 24.	Risque de déséquilibre en azote .....	64



Tableau 25. Risque de déséquilibre en phosphore .....	64
Tableau 26. Déduction de la fertilité du sol en potassium (1,7-4 %C org.) .....	65
Tableau 27. Risque de déséquilibre en potassium .....	65
Tableau 28. Aptitude du sol à produire du maïs-grain .....	70
Tableau 29. Productivité potentielle en maïs-grain .....	72
Tableau 30. Classification de l'érodabilité et des risques de ruissellement .....	74
Tableau 31. Classification de la vulnérabilité au lessivage .....	75
Tableau 32. Risques de déséquilibre en NPK .....	76
Tableau 33. Estimation des superficies réceptrices par classe .....	78
Tableau 34. Superficies réceptrices selon différents scénarios d'épandage .....	79

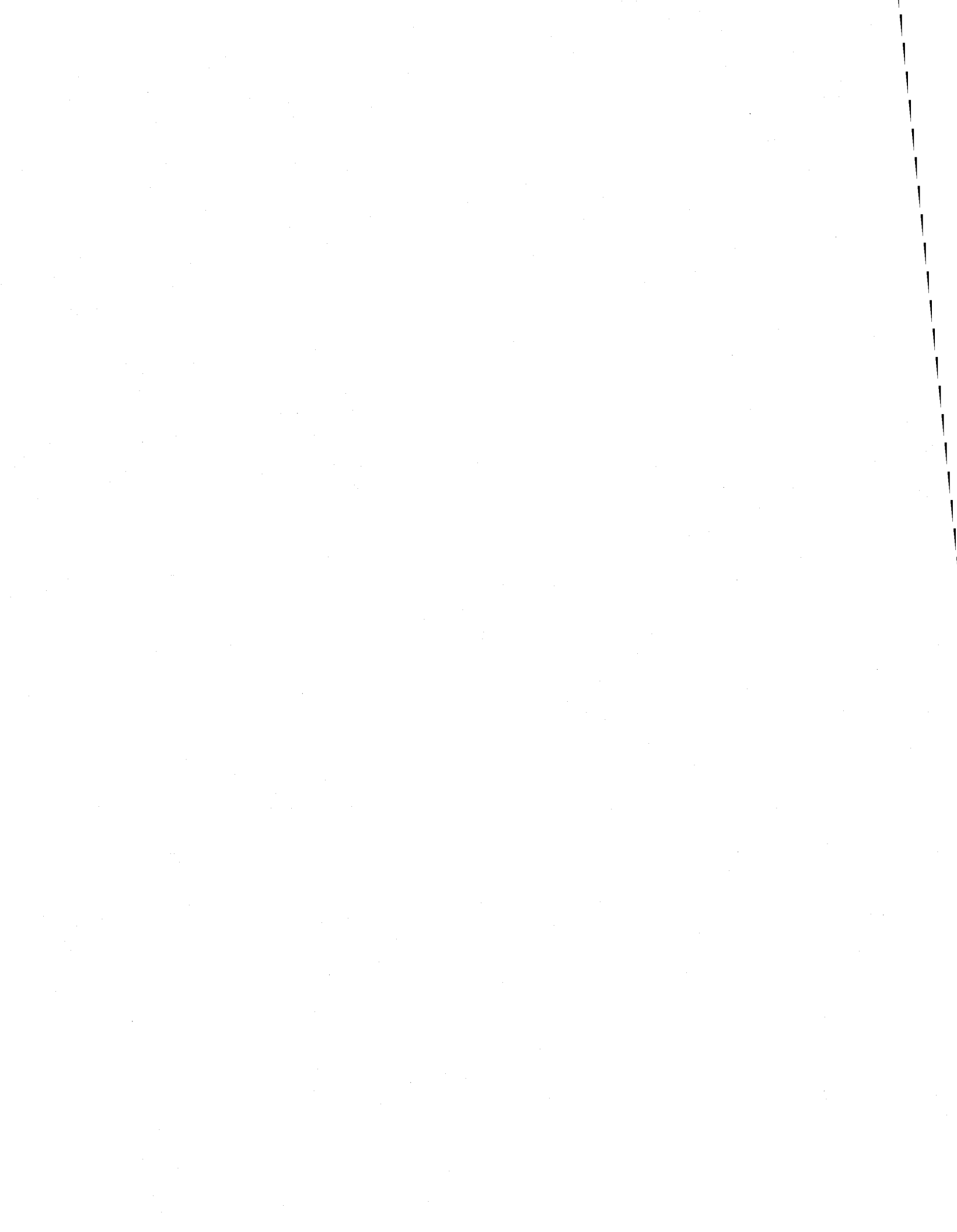
## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Principaux processus reliés aux activités d'épandage .....	8
Figure 2.	Volumes des types d'engrais de ferme par bassin .....	19
Figure 3.	Étapes de l'évaluation des terres proposée par la FAO .....	36
Figure 4.	Modèle d'évaluation de l'aptitude physique des sols .....	55
Figure 5.	Potentiel de recyclage par le maïs .....	57
Figure 6.	Évaluation des risques de pertes à l'environnement .....	60



## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1.	Facteurs pédologiques limitants définis selon trois degrés de sévérité du système ITC modifié .....	107
Annexe 2.	Position géographique de la région à l'étude dans le Québec méridional	109
Annexe 3.	Caractéristiques de sol des unités cartographiques retenues .....	110
Annexe 4.	Résultats de l'enquête auprès des experts .....	115
Annexe 5.	Aptitude à produire du maïs .....	118
Annexe 6.	Conditions de mécanisation .....	118
Annexe 7.	Conditions d'ensemencement .....	119
Annexe 8.	Évaluation de l'indice d'érodabilité et du ruissellement .....	120
Annexe 9.	Vulnérabilité au lessivage (sol profond et de bonne perméabilité) .....	121
Annexe 10.	Capacité de rétention du phosphore .....	122
Annexe 11.	Estimation du dépassement des besoins du maïs en P et K .....	123
Annexe 12.	Caractéristiques affectant l'aptitude des sols à produire le maïs .....	124
Annexe 13.	Qualités des terres affectant la productivité potentielle pour le maïs ....	125
Annexe 14.	Prélèvements en NPK par le maïs et possibilités d'exportation .....	126
Annexe 15.	Classification selon les risques de volatilisation .....	126
Annexe 16.	Classification selon les risques de ruissellement par scénario .....	127
Annexe 17.	Superficies estimées par classe de risques de lessivage .....	128
Annexe 18.	Capacité de rétention du phosphore .....	128
Annexe 19.	Classification globale des séries de sols (drainés) .....	129
Annexe 20.	Évaluation selon Heidlage et Shingleton .....	129



# **Introduction**



## INTRODUCTION

---

La problématique du contrôle de la pollution d'origine animale a été analysé dans les volumes précédents, au niveau 1) des tendances à l'industrialisation des productions animales, 2) de la conception d'une politique de contrôle de la pollution provenant ces productions et 3) de la formulation des relations doses-réponses à l'aide de modèles mathématiques.

Tel qu'expliquée dans ces volumes, la conséquence la plus répandue et la plus dommageable des activités agricoles est la pollution de l'eau. La gestion inadéquate des déjections animales, déchets pour les élevages de type industriel, constitue une source importante de pollution. Aussi, l'épandage sur les terres agricoles reste actuellement le seul moyen de disposition économique et légale de disposer de ces déjections animales. Si les politiques environnementales actuellement en vigueur ne sont pas améliorées, il est à craindre que le problème de pollution issue de la gestion inadéquate des déjections s'accroisse.

Compte tenu de la difficulté d'établir un lien facilement mesurable entre la quantité d'engrais organiques épandus sur une parcelle et la quantité de polluants retrouvée dans l'eau, il est proposé d'établir un lien indirect entre la qualité de l'eau et le respect de la capacité de réception des sols agricoles. Le troisième rapport démontrait que le niveau actuel des connaissances scientifiques permettait l'évaluation de cette capacité de réception. Une méthodologie était proposée pour établir des courbes doses-réponses à l'aide de modèles mathématiques de processus. Aussi, cette méthode permet de traiter le problème de la pollution diffuse comme un problème de pollution ponctuelle.

Toutefois, une approche plus globale à l'échelle du bassin versant ou régionale est également nécessaire pour respecter la variabilité de la capacité d'assimilation entre régions et pour identifier des objectifs agro-environnementaux réalistes. Bien que l'approche précédemment proposée soit intéressante pour l'évaluation de la capacité de réception à l'échelle de la parcelle, ces modèles sont difficilement transférables à d'autres échelles spatiales, entre autres, parce que la précision des résultats dépend de celle des données d'entrées. Aussi, les données nécessaires au fonctionnement des modèles et l'acceptation de leur utilisation à des fins d'établissement d'une taxe ou d'un quota par exemple, nécessite un certain temps avant de faire consensus entre les divers intervenants et d'être intégré aux politiques agricoles et environnementales actuelles.

Dans ce contexte, le présent rapport tente de vérifier si la capacité de réception d'une région à l'égard des engrais de ferme pourrait être évaluée de façon satisfaisante à partir des données pédologiques actuellement disponibles au Québec (rapports et cartes pédologiques) et s'il est possible d'intégrer le facteur « sol » à l'évaluation actuelle de la capacité support d'une région.

Actuellement, la capacité de réception s'estime par un bilan agronomique. À l'aide des déclarations des producteurs agricoles, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) peut évaluer le nombre d'hectares cultivés par type de culture. Sur une base municipale, une densité animale maximale à l'hectare peut être calculée en se basant sur les besoins en azote des cultures par rapport à la quantité de fumiers et lisiers produits annuellement. Alors, les besoins des différentes cultures déterminent la quantité



d'engrais qu'il est souhaitable d'épandre. Ainsi, sur un territoire donné, les superficies en culture disponibles pour l'épandage limiterait, en théorie du moins, les producteurs dans leur capacité de production animale selon le présent règlement en vigueur. Toutefois, cette méthode d'évaluation de la capacité de réception ne tient compte, entre autres, ni de la variabilité des sols et celle de leur aptitude intrinsèque à minimiser ou non les pertes d'éléments potentiellement polluants, ni de la diversité des pratiques agricoles, ni des distances entre les lieux d'entreposage et des lieux d'épandage.

Bien que déjà traités dans le volume précédent, le premier chapitre présente les principaux processus engendrant des pertes environnementales dommageables pour la qualité des eaux et la qualité des sols, mais en insistant particulièrement sur les caractéristiques et les qualités des sols impliqués dans chaque processus. Le deuxième chapitre traite de l'utilisation des engrais de ferme en tant que fertilisant en insistant sur la cynétique entre la fertilité des sols et l'efficacité des apports d'engrais de ferme. Puisque le troisième volume traitait des modèles mathématiques, une revue de littérature sur d'autres méthodes sera exposée au troisième chapitre. Au quatrième chapitre, une méthode d'évaluation indirecte sera proposée basée sur la méthodologie suggérée par la FAO. Un système expert a été conçu à l'aide du logiciel ALES (Automated Land Evaluation System) afin d'interpréter les données pédologiques et classer les unités cartographiques. Quelques séries de sols de la région du sud-est de la plaine de Montréal ont servi d'échantillon. Les résultats seront discutés au cinquième chapitre.

**Chapitre 1**  
**Pollution agricole provenant des**  
**productions animales :**  
**causes et processus**



# 1. POLLUTION AGRICOLE PROVENANT DES PRODUCTIONS ANIMALES: CAUSES ET PROCESSUS

---

Dans ce chapitre, on traite principalement des dommages environnementaux issus des activités d'épandage d'engrais de ferme. Sur plusieurs bassins versants (Novotny et Chester 1981, Simoneau 1993), ces apports en éléments nutritifs compromettent les usages normaux de la ressource-eau et la productivité des sols à long terme. Quatre types de pollution sont abordés. 1) La pollution de l'atmosphère résulte de l'apport de substances volatiles à l'atmosphère, principalement l'ammonium. Aussi, les odeurs dégagées lors de l'épandage sont un irritant pour plusieurs municipalités qui adoptent ou s'approprient d'adopter des règlements à cet effet. 2) La pollution des eaux dépend de l'apport de minéraux ou de substances organiques dissoutes ou en suspension dans les eaux de surface et 3) dans les eaux souterraines. Finalement, de mauvaises pratiques d'épandages peuvent entraîner 4) la dégradation de la qualité des sols agricoles par compaction et par l'enrichissement en phosphore et en potassium.

Cette analyse permettra de mettre en relief les principaux facteurs qui gouvernent le niveau des pertes vers l'atmosphère et vers les eaux de surface ou souterraines ainsi que les facteurs qui déterminent les risques de pollution des sols. Puisqu'on tente de déterminer la *capacité intrinsèque* des sols à soutenir les activités d'épandage, une attention particulière est portée sur les propriétés du sol impliquées dans chaque processus. Un tableau synthèse résumera les principales propriétés des sols pouvant servir à définir la capacité des sols à recevoir des engrais de ferme de façon viable.

Les éléments potentiellement polluants sont essentiellement l'azote sous forme organique, ammoniacale ou de nitrates, le phosphore, les particules fines de sol érodées et des organismes pathogènes susceptibles d'entraîner des maladies chez les humains et les animaux (salmonelloses, colibacilloses, etc.). Les composés azotés sont potentiellement polluants pour l'atmosphère, les eaux de surface et les eaux souterraines (Keeney 1983). Par volatilisation, ils contribuent aux pluies acides et à la déplétion de la couche d'ozone (Gangbazo et al. 1985, van Lanen, 1992). L'azote ammoniacal en trop grande quantité diminue l'acidité naturelle des cours d'eau et peut l'augmenter dans le cas des sols<sup>9</sup>. Les nitrates présentent un danger pour la santé humaine lorsque la concentration de  $\text{NO}_3$  dépasse 10mg/l.

Les composés phosphatés peuvent nuire principalement à la qualité des eaux de surface. Ils contribuent à l'eutrophisation des eaux de surface en favorisant la prolifération des plantes aquatiques qui réduisent la quantité d'oxygène disponible dans l'eau. Quant à la pollution des sols, elle résulte de l'accumulation d'éléments à un niveau dépassant la capacité d'adsorption des sols et pouvant entraîner une augmentation des éléments solubles dans les sols, un déséquilibre nutritif pour les plantes ou un risque de phytotoxicité dans le cas des métaux lourds.

---

<sup>9</sup> "La nitrification de l'ion ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )...donne la formation d'ions nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et des ions hydrogènes acidifiants" (Tran 1988).

La pollution des eaux de surface et des eaux souterraines issue des épandages sur les sols agricoles dépend de la capacité intrinsèque des sols de retenir ces éléments, d'une part, et de la capacité d'assimilation des plantes. La capacité intrinsèque des sols à retenir ces éléments varie en fonction de la quantité et de la nature des éléments épandus et des propriétés du sol qui régissent les processus chimiques, biologiques et physiques. Les principaux processus physiques sont gouvernés par le mouvement de l'eau dans les sols et à leur surface, soit le ruissellement et le lessivage. Les processus chimiques et biologiques sont les phases de dégradation, de volatilisation, d'adsorption, de précipitation et de fixation par les micro-organismes du sol et par les plantes. Ces processus biophysico-chimiques ont lieu simultanément. Ils sont régis par les conditions d'humidité, de température et d'oxydo-réduction des sols, par le type et la densité de la biomasse ainsi que par la disponibilité en nutriments. Aussi, la vitesse des réactions de ces processus est influencée par la topographie, le climat et les pratiques agricoles.

La figure 1 résume les principaux processus impliqués. Au centre, la capacité de rétention réfère à la capacité d'assimilation des sols par des processus biochimiques. Les flèches indiquent les exportations possibles des éléments par volatilisation, ruissellement ou lessivage ou encore par le recyclage par les cultures. Le bilan hydrique (climat) et la quantité d'engrais épandue sont des facteurs externes qui influencent la capacité support des sols. Aussi, l'importance de ces processus et leurs impacts varient-ils en fonction de plusieurs facteurs d'ordre pédologique, agronomique, climatique et anthropique.

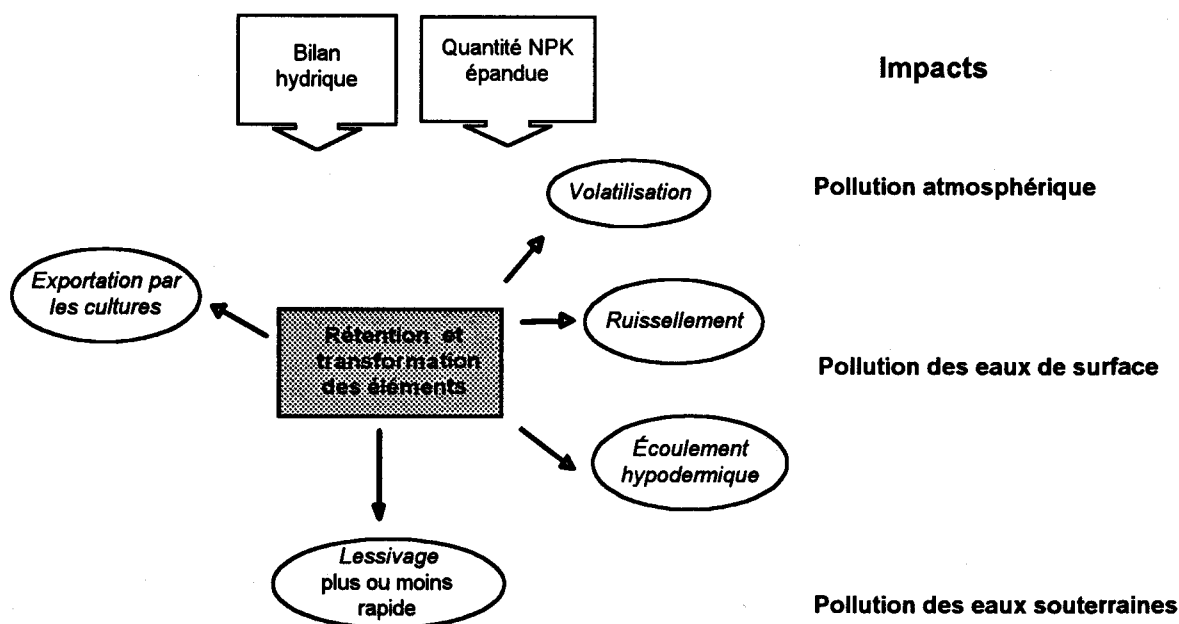


Figure 1. Principaux processus liés aux activités d'épandage

### 1.1. Pollution de l'air par volatilisation de l'azote

Les pertes d'azote ammoniacal par volatilisation diminuent la valeur fertilisante de l'engrais épandu. Par exemple, la fraction d'azote ammoniacale ( $\text{NH}_4$ ) contenu dans le lisier de porc représente 70% de l'azote total (Robert 1992). Pertes économiques pour le producteur de

maïs, elles contribuent également aux pluies acides<sup>10</sup> (Gangbazo et al. 1985, van Lanen 1992). Aussi, la dénitrification de l'ammonium en  $N_2O$  ( $NO_3^-$  ou  $NO_2^- \Rightarrow N_2O \Rightarrow N_2$ ) semble contribuer à la déplétion de la couche d'ozone, mais peu de données existent à ce sujet.

L'importance du processus de volatilisation varie surtout en fonction de la quantité et de la nature de l'azote appliqué, du mode d'épandage et de la période d'application. Le processus de dénitrification ou de réduction est la source majeure de perte vers l'atmosphère. Processus plutôt anaérobie, les bactéries utilisent  $NO_3^-$  lorsque l'oxygène ne diffuse plus à cause de la saturation du sol en eau. La perte d'ammoniaque par volatilisation augmente avec la température ambiante, les mouvements de l'air et le pH du sol (Keeney 1983, Clay et al. 1990). Les pertes maximales correspondent aux périodes d'évaporation rapide de l'eau du sol et de la rosée. La volatilisation suit le cycle diurne des fluctuations de température de la surface du sol, température qui influence l'hydrolyse de  $NH_4^+$  et les réactions d'équilibre ( $NH_4^+ \Leftrightarrow NH_3$ ) (Sherlock et Goh 1985 tiré de CPVQ 1982, Clay et al. 1990). Les pertes maximales correspondent aux périodes d'évaporation rapide de l'eau du sol et de la rosée. Le tableau 1 résume l'influence des facteurs sur la volatilisation relevés dans la littérature.

**Tableau 1. Facteurs influençant la volatilisation de l'azote**

Facteurs	Volatilisation	Explication
Température	↑	Évaporation ↑, Réaction d'équilibre ↑
Humidité de l'air	↑	Échange air-sol ↓
Humidité de sol	↑	Évaporation, dénitrification si saturation
Précipitation	↑	Température ↓, Lessivage de $NH_4^+$ ↑
pH	↑	Disponibilité de $NH_4^+$ ↓, Forme aqueuse $NH_3$ ↑
CEC	↑	Fixation de $NH_4^+$
Nitrification	↑	idem
Présence de résidus	↑	Température ↓, Humidité de sol ↑
Couvert végétal	↑	Température ↓, Rétention ↑, Perméabilité ↑
Dose épandue	↑	Disponibilité de $NH_4^+$ ↑
Temps de contact avec le sol	↑	Fixation de $NH_4^+$ ↑, adsorption et nitrification

Source: CPVQ 1982, Beauchamp et al. 1982, Brady 1984, Ferguson et al. 1984, Clay et al. 1990, Simard 1990

Deux qualités du sol semblent déterminer le potentiel de volatilisation: la capacité d'infiltration de l'eau et la capacité du sol à retenir rapidement l'azote ammoniacal. La capacité d'infiltration du lisier est proportionnelle au taux d'infiltration de l'eau dans la couche de surface du sol et inversement proportionnelle au pourcentage de matières solides du lisier et de sa viscosité (Gangbazo et al. 1992). La teneur en eau de la couche de surface avant l'épandage influence aussi la capacité d'infiltration, car l'eau gonfle les colloïdes et

<sup>10</sup> Plusieurs travaux européens ont démontré que dans les régions à concentration animale élevée, les eaux de pluie contiennent trois fois plus d'ammoniac que la normale et que les eaux de surface sont plus concentrées en cet élément qu'en zone urbaine.

réduit l'indice de vides. La capacité du sol à retenir les cations dépend de la texture et du temps de contact avec les colloïdes du sol.

Le délai entre l'application et l'incorporation du produit au sol semble un facteur critique pour ce processus. Aussi, l'enfouissement immédiatement après l'épandage s'avère un moyen efficace de minimiser les pertes par volatilisation, bien que la volatilisation ne soit pas entièrement éliminée (Marriott et al. 1977 dans CPVQ 1982).

## 1.2. Pollution des eaux de surface

D'après Novotny et Chesters (1981), la pollution diffuse d'origine agricole est essentiellement un problème de nature hydrologique. La pollution issue des épandages se manifeste surtout après les précipitations et la fonte des neiges. L'eau, agent de transport, ruisselle à la surface du sol, s'infiltré dans le sol et se mélange avec la solution du sol, puis entraîne vers les drains artificiels et les eaux souterraines des éléments potentiellement polluants. En milieu agricole, l'érosion des sols et le ruissellement de l'eau ou du lisier sont les principales causes du transport de matières polluantes vers les eaux de surface. Ces matières sont principalement le phosphore soluble et les matières en suspension (matière organique et particules fines enrichies).

La gestion du phosphore (P) en provenance de l'épandage d'engrais de ferme est un problème majeur dans plusieurs pays d'Europe et d'Amérique en raison de son rôle dans l'accélération de l'eutrophisation des cours d'eau. Les résultats obtenus dans le cadre du développement d'un indice  $P^{11}$  aux États-Unis indiquent que la plupart des sols agricoles présentent actuellement de fortes concentrations en  $P_{ass}$  (phosphore assimilable). La compilation d'un échantillonnage des analyses de sol des cultures commerciales en 1989 montre que 50% des sols américains, 48% des sols ontariens et 59% des sols de Colombie Britannique présentent des concentrations allant d'élevées à excessivement élevées en P assimilable (Sim 1993). On assume logiquement que les sols à forte concentration en  $P_{ass}$  présentent plus de risques, d'autant plus que les pertes en phosphore se font surtout sous forme particulaire (75 à 90%, Pesant 1990, Sharpley 1993, Sim 1993). Ces pertes sont fortement corrélées au délai entre l'application et un événement pluvieux important, servant d'agent d'érosion (Prato et Shi 1990, Gangbazo et al. 1992, Truman et al. 1993).

Selon les travaux de Pionke et Hunishi (1992), l'enrichissement en phosphore des eaux de surface issu du ruissellement et de l'érosion des sols est corrélé avec la teneur en phosphore des deux premiers centimètres de sol. Toutefois, dans les bassins versants ayant un bilan hydrique élevé et des taux d'érosion faibles à modérés, le phosphore soluble, transporté par l'eau des précipitation, contribue en grande partie à l'enrichissement en phosphore des eaux de surface. Aussi, les auteurs concluent-ils qu'une stratégie de contrôle de pertes en

---

*11 Cet indice vise l'évaluation de la contribution du P provenant des sols à la pollution diffuse, dans l'objectif de développer des stratégies de gestion des fertilisants par bassin versant (Sim 1993). L'indice P intègre le  $P_{ass}$  du sol, la gestion des engrais organiques et minéraux et les processus de transport (érosion et ruissellement). Il permet de classer les sites d'un bassin en fonction de leur potentiel à contribuer à la pollution diffuse. Il importe de noter que les limites de classe de fertilité en P varie selon les états et les provinces, le type de culture et les méthodes utilisées pour l'extraction du P.*

phosphore, basée uniquement sur le contrôle de l'érosion des sols ne serait pas efficace pour ces types de bassins.

Le ruissellement se produit lors d'un important événement pluvieux et lorsque la surface du sol est peu perméable et/ou saturée d'eau. Trois conditions simultanées sont nécessaires au processus: le climat (précipitations), la pente (degré et longueur) et les conditions de sol (degré de saturation en eau, capacité d'infiltration et stabilité des agrégats). Processus naturel, l'érosion hydrique consiste 1) au détachement des particules de sol par l'eau sous l'impact des gouttes de pluie et du ruissellement, 2) à leur transport et 3) à leur redéposition. L'importance du processus est proportionnelle à l'intensité, la durée et la fréquence des précipitations et la vitesse de la fonte des neiges (Wu et al. 1989, Bernard 1988, Tabi et al. 1990). Ainsi, la capacité intrinsèque d'un sol à minimiser les pertes par ruissellement et par érosion est fonction de son indice d'érodabilité et de la pente.

L'érodabilité traduit la résistance inhérente d'un sol à la dégradation et à l'érosion, soit hydrique, soit éolienne. Elle est déterminée par la force de cohésion entre les particules de sol. Celle-ci peut varier durant l'année selon la présence d'un couvert végétal, la teneur en eau du sol et le développement de sa structure. Toutefois, certaines propriétés du sol permettent d'identifier les sols susceptibles d'être érodés, telles que la texture et la teneur en matière organique. Cette dernière favorise la stabilité de la structure. Par conséquent, les séries de sol les plus érodables ont un fort pourcentage de sable très fin ou de limon, une couche de surface pas ou peu structurée et une faible teneur en carbonates et en matière organique. Le tableau 2 résume l'influence des principaux facteurs sur le ruissellement et l'érosion hydrique.

Wischmeier et Smith (1978) ont développé un nomographe pour estimer l'érodabilité du sol, soit le facteur K de l'équation universelle de perte de sol (USLE). Les caractéristiques de sol utilisées sont le pourcentage de sable très fin, de limon et de matière organique, la structure du sol et sa perméabilité. Latreille et al. (1993) évalue le facteur K par la relation suivante:

$$K=[(2.1(SL(100-AR))^{1.14} \cdot 10^{-4} \cdot (12-MO)+3.25(s-2)+2.5(p-3))/100] \cdot 0.1317$$

où *K*: indice d'érodabilité

*SL*: % de sable très fin et de limon

*AR*: % d'argile

*MO*: % de matière organique

*s*: Code de structure du sol

*p*: code de perméabilité du sol (Codes proposés par Cook et al. 1985)



**Tableau 2. Facteurs influençant le ruissellement et l'érosion hydrique**

Facteurs	Influence	Explication
Pente (degré et longueur)	↑	Vitesse de l'eau et force érosive ↑ influence également la distance de transport.
Précipitations	↑	Intensité, durée et fréquence
Vitesse de fonte des neiges	↑	Apport important d'eau lorsque le sol est déjà saturé ou encore gelé.
Saturation en eau du sol	↑	Eau excédentaire
Perméabilité	↓	Vitesse d'infiltration ↑
Profondeur de la couche imperméable	↑	Capacité d'infiltration et capacité de rétention de l'eau ↑
% matière organique	↓	Capacité de rétention de l'eau et des éléments ↑
% sable très fin et limon	↑	Érodabilité ↑
Structure du A <sup>a</sup>	↓	Érodabilité ↓
Couvert végétal	↓	Capacité de retenir l'eau et les éléments ↑, infiltration ↑ impact des gouttes de pluie sur le sol et vitesse d'écoulement ↓, lessivage ↑
Résidus de récolte	↓	Idem
Dose épandue	↑	Plus grande quantité de liquide et d'éléments apportés
Travail du sol	↓	Infiltration ↑, ruissellement ↓, érosion du sol ↑
Présence de drains <sup>b</sup>	↓	Capacité d'infiltration ↑, donc évacuation de l'eau dans le profil plus rapide

<sup>a</sup>Couche de surface

<sup>b</sup>L'évacuation de l'eau du profil par les drains entraîne les éléments nutritifs vers les eaux de surface et contribue à leur pollution.

### 1.3. Pollution des eaux souterraines

Le principal risque de pollution des eaux souterraines résulte du lessivage des nitrates. La contamination de l'eau par les nitrates est observée dans les régions rurales où les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement<sup>12</sup>. Le lessivage se produit lors de l'écoulement de l'eau du sol par gravitation lorsque la capacité au champ<sup>13</sup> est dépassée jusqu'à la saturation complète du sol. Par conséquent, la quantité d'eau et d'éléments solubles lessivés dépend de la capacité du sol à retenir ces derniers, du régime hydrique du sol, des précipitations, de la densité du couvert végétal et de la dose d'engrais épandue.

<sup>12</sup> Les nitrates présentent un danger pour la santé humaine. Leur réduction par la flore intestinale des nouveaux nés dont le pH est plus élevé que les adultes et de certains animaux fait que les nitrites sont rapidement absorbés dans le sang et agissent comme oxydant en transformant le fer ferreux en fer ferrique.

<sup>13</sup> La capacité au champ, ou capacité de rétention, indique la quantité d'eau qui reste dans le sol après son ressuyage. Elle représente la capacité d'absorption totale d'un sol et correspond à son taux d'humidité maximal (Doucet 1992, p.91)

Les pertes par lessivage se font donc surtout au printemps et à l'automne où les concentrations en  $\text{NO}_3^-$  sont plus élevées et que le sol est saturé en eau. Les nitrates sont très solubles et facilement lessivables. Très mobiles dans les sols, ils tendent à s'accumuler dans les eaux souterraines. Leur évolution dans le sol est multiple. Une fraction est absorbée par les plantes. Une autre est immobilisée par la microflore proportionnellement avec le rapport C/N. Une troisième fraction est perdue par lessivage puisque la capacité anionique des sols est faible. Finalement, une fraction est perdue par dénitrification. Alors, sans couvert végétal pour les absorber, les nitrates migrent vers les horizons inférieurs du sol pour être finalement évacués hors du profil plus ou moins rapidement selon les apports en eau, la vitesse d'infiltration dans le sol et l'épaisseur du sol. Ainsi, la capacité du sol à retenir les nitrates sera influencée par ces dernières propriétés du sol qui caractérisent le type de régime hydrique. Le tableau 3 expose l'influence de certains facteurs sur les pertes par lessivage.

**Tableau 3. Facteurs influençant le lessivage**

Facteurs	Influence	Particularités
% d'argile ↑	↓	Rétention des cations ↑, barrière physique et chimique
% matière organique ↑	↓	idem
% sable ↑	↑	Rétention des cations ↓ Perméabilité ↑
pH ↑	↓	Rétention des anions ↓ Rétention des cations ↑
Perméabilité ↑	↑	Vitesse d'infiltration ↑
Profondeur de la couche imperméable ↑	↑	Capacité d'infiltration ↑
Réserve en eau utile ↑	↓	Stockage de l'eau ↑
Précipitations ↑	↑	Intensité, durée et fréquence
Saturation en eau du sol ↑	↑	Eau excédentaire gravitaire
Couvert végétal ↑	↓	Capacité de retenir l'eau et les éléments ↑
Dose épandue ↑	↑	Plus grande quantité de liquide et d'éléments apportés
Travail du sol ↑	↑	Infiltration ↑
Présence de drains souterrains ↑	↓	Évacuation de l'eau du profil vers les eaux de surface

D'après la littérature, peu de phosphore est perdu par lessivage en raison de sa grande affinité avec les composantes du sol. Par contre, lorsque la capacité d'adsorption des sols en phosphore est dépassée, les teneurs des formes solubles ( $P_{\text{soluble}}$ ) s'accroissent au niveau des horizons C où les drains agricoles sont normalement situés (Simard et al. 1993). Selon Inuzo et al. (1991), les risques de lessivage du phosphore augmentent lorsque la teneur en phosphore du sol atteint plus de 25% de la capacité de fixation en phosphore des sols. (La capacité de fixation des sols est traitée au point suivant.) Quant au potassium, peu d'études soulève son impact sur la santé humaine ou aquatique.

## 1.4. Dégradation des sols agricoles

Les risques de dégradation des sols agricoles sont proportionnels à leur capacité à fixer et à accumuler les éléments en provenance des fumures organiques. Dans les élevages intensifs, les compléments minéraux et les produits vétérinaires sont fortement utilisés<sup>14</sup>. Étant peu assimilés par les animaux, ces éléments se retrouvent à 95% dans les déjections. Selon LGL (1990), certains risques de phytotoxicité par le cuivre existent à long terme dans les zones recevant de fortes doses de lisiers de porcs (>2.5 kg Cu/ha). Le cuivre est un élément essentiel à la plante, mais peut aussi lui être toxique si on excède une certaine dose. La différence entre le niveau de déficience (1 à 5 ppm) et de toxicité (16 à 20 ppm) est minime (Giroux et al. 1992).

D'autre part, l'interaction entre les éléments essentiels à la croissance des cultures et la surabondance de l'un d'eux peuvent entraîner des effets de carence et une diminution des rendements<sup>15</sup>. À long terme, l'épandage de fortes doses d'engrais de ferme représente des risques d'accumulation d'éléments dans les sols. Ces risques sont également reliés à la gestion des sols et aux antécédents d'épandage. On parle alors de surfertilisation ou de déséquilibre nutritif dans les sols tel que diagnostiqué par des quantités excessives en phosphore ou en potassium ( $\geq 500$  kg/ha) dans la couche de labour (Tabi et al. 1990). Rappelons que cet enrichissement de la couche de surface contribue à la pollution des eaux de surface.

En outre, tout changement physique ou chimique affectant négativement la capacité des sols à produire influence l'aptitude des sols à recevoir des engrais de ferme comme l'acidification des sols et la compaction des sols. Par exemple, la nitrification de  $\text{NH}_4^+$  vers  $\text{NO}_3^-$  libère des ions  $\text{H}^+$  et contribue à l'acidification des sols (Tran 1988). Toutefois, les engrais de ferme, par leur composition variée, sont moins susceptibles d'acidifier les sols que les engrais minéraux. D'autre part, la compaction des sols résultant du passage de l'épandeur à lisier s'avérait une contrainte pour 53% des producteurs dans le bassin de la Yamaska où les sols sont principalement argileux et limoneux, d'après une enquête sur le taux d'acceptation du lisier (Statbec 1989).

## 1.5 Synthèse

Tel que vu dans ce chapitre, le contrôle de la pollution diffuse en milieu agricole est complexe pour plusieurs raisons. La pénétration des éléments polluants dans les eaux est non ponctuelle et elle est reliée à l'occurrence des événements météorologiques. Le transport des éléments se fait dans et sur le sol avant d'atteindre les eaux. La source exacte de la pollution est difficile à retracer ce qui rend la surveillance ardue (suivi et application de mesures de contrôle de la pollution). Finalement, le degré de pollution est relié en bonne partie à des facteurs incontrôlables tels que le climat, le type de sol, la géologie, la topographie (Novotny et Chester 1981).

---

*14 Le Cu est ajouté à l'alimentation pour favoriser la croissance et le zinc comme fongicide.*

*15 Par, exemple, un excès en azote ammoniacal gêne l'absorption du bore, du potassium, du calcium et du magnésium. Un excès de phosphore soluble diminue l'absorption du potassium, du zinc, du fer et du cuivre. Un excès de potassium peut engendrer une carence en magnésium (Doucet, 1992).*

Par conséquent, il serait difficile d'établir un lien direct entre la quantité d'engrais de ferme épandue sur un champ et sa contribution à la dégradation de la qualité de l'eau. Par contre, il est possible d'identifier un lien indirect en tenant compte de la capacité de réception des sols à l'égard des engrais de ferme. La capacité de réception d'un sol réfère à sa capacité de recevoir des engrais (organiques et inorganiques) de façon à maximiser la productivité du sol (dont dépend la rente du producteur agricole), sans causer de dommage à la nappe phréatique et au cours d'eau. Le tableau 4 résume les principaux facteurs et leur influence sur la capacité des sols à minimiser les pertes à l'environnement.

**Tableau 4. Facteurs affectant les processus de pertes d'éléments nutritifs**

FACTEURS		PROCESSUS		
		Volatilisation	Ruissellement	Lessivage
Physiques des sols	Pente ↑		↑	↓
	% d'argile ↑		↑	↓
	% matière organique ↑		↓	↓
	% sable ↑	↑	↓ sauf si très fin	↑
Régime hydrique des sols	Perméabilité ↑	↓	↓	↑
	Profondeur de la couche imperméable ↑	↑	↑	↓
	Saturation en eau du sol ↑	↑	↑	↑
(Anthropique)	Présence de drains souterrains ↑		↓	↓
Climatique	Précipitations ↑	↓	↑	↑
Anthropiques	Couvert végétal ↑	↓	↓	↓
	Dose épandue ↑	↑	↑	↑
	Travail du sol ↑	↓	↓	↑

Le respect de cette capacité de réception permettrait un contrôle sur la pollution issue des activités d'épandages. Le prochain chapitre porte sur la rationalisation des épandages. Le contexte québécois actuel sera exposé brièvement. Puis seront dégagés les éléments essentiels à l'utilisation rationnelle des engrais de ferme en tant que fertilisant. Ces éléments sont les facteurs influençant la productivité des terres agricoles.

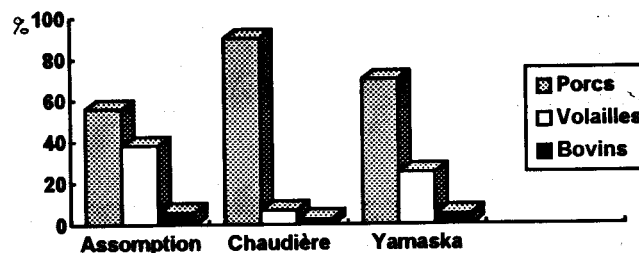


**Chapitre 2**  
**Rationalisation des épandages**  
**comme moyen de contrôle de la**  
**pollution**



## 2. RATIONALISATION DES ÉPANDAGES COMME MOYEN DE CONTRÔLE DE LA POLLUTION

En 1992, le MAPAQ évaluait le volume annuel des fumiers et lisiers à  $32.5 \times 10^6$  mètres cubes. L'élevage bovin (laitier et de boucherie) compte pour 66% du volume total de déjections et l'élevage porcin pour 27%. Ce dernier de type industriel, qui fait l'objet de la présente recherche, ne nécessite que très peu de surface au sol, la superficie requise se limitant aux bâtiments d'élevage, d'où l'appellation d'élevage hors sol. La gestion des déjections y est liquide à 97%. La seule méthode de disposition acceptable en termes de coûts est l'épandage sur les sols agricoles durant des périodes peu propices aux pertes vers les cours d'eaux. Entre temps, le lisier est entreposé dans une fosse ou un réservoir. Plusieurs entreprises porcines ne possèdent pas les superficies requises pour disposer de leurs lisiers et n'ont pas accès à des superficies d'épandage suffisantes dans leur localité. Cette situation entraîne la production de surplus de lisiers. La figure 2 donne un aperçu des volumes générés sur trois bassins versants aux prises avec des surplus de lisier de porc : on remarque l'importance des surplus de déjections générés par l'élevage porcin comparativement aux autres types d'élevage.



Adapté de Fortin et al. 1992

Figure 2. Volumes des types d'engrais de ferme par bassin

Dans ce contexte de surplus, les déjections animales deviennent alors des déchets sans valeur économique ou agronomique pour l'éleveur. Pourtant, les engrais de ferme possèdent une valeur fertilisante non négligeable et ils peuvent remplacer avantageusement l'utilisation des engrais minéraux. Par exemple, la valeur du lisier de porc serait d'environ 45,5 millions de dollars selon le prix moyen des engrais minéraux de 1991 (Lemelin et al. 1992). Compte tenu des problèmes de pollution soulevés au chapitre précédent, ce constat soulève la nécessité d'une rationalisation des épandages utilisés comme moyen de disposition des engrais de ferme.

Actuellement, la "capacité support"<sup>16</sup> d'un territoire donné à l'égard des activités d'épandage s'estime par un bilan agronomique, car le principe de base de la valorisation des engrais de

<sup>16</sup>Le concept de capacité support suggère qu'il existe des limites au niveau de croissance et de développement que l'environnement naturel peut absorber sans menacer le bien-être de la population (Lein 1993, Sasseville 1993). La capacité support du milieu définit alors le degré ou l'intensité des activités humaines qu'un milieu physique peut supporter à perpétuité et à un niveau acceptable. Son évaluation permet d'établir des objectifs agro-environnementaux réalistes.



ferme est de se limiter au potentiel de recyclage offert par les cultures elles-mêmes. L'épandage permet alors l'épuration des fumiers et lisiers par le système "plante-sol" où le sol joue le rôle de support aux cultures.

À cet effet, le règlement sur la prévention de la pollution des eaux par les établissements de production animale (RQ-2r.18) fixe une quantité maximale de fumier et lisier exprimée en kilogramme d'azote par hectare (kg N/ha) par catégorie de culture. Les quantités spécifiées dans ce règlement correspondent à la quantité maximale de dépôt dans l'environnement d'un contaminant au sens de la Loi sur la qualité de l'environnement (art.31,par.d) et non à une recommandation de fertilisation agronomique<sup>17</sup>. Ce bilan ne tient pas compte de facteurs agronomiques tels que des pertes d'azote de 50% lors de l'entreposage et de l'épandage ou d'une norme agronomique suggérant de combler seulement 50% des besoins en azote des cultures avec les engrais de ferme.

Par exemple, un producteur de maïs peut épandre légalement un maximum de 170 kg N/ha/an sur ses cultures en tout temps sauf sur un sol gelé ou couvert de neige. À l'aide des données sur les producteurs agricoles, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) peut évaluer de façon assez précise le nombre d'hectares cultivés par type de culture. Sur une base municipale, une densité animale maximale à l'hectare peut être calculée en se basant sur les besoins en azote des cultures par rapport à la quantité de fumiers et lisiers produits annuellement.

Une étude sur la gestion des surplus d'engrais de ferme sur le bassin de la rivière Yamaska (Gangbazo et Buteau. 1985), estime des surplus de 1 300 tonnes d'azote par année par rapport aux superficies disponibles pour l'épandage à l'aide de scénarios d'épandage. Par contre, un déficit de 18 000 tonnes est estimé en se basant sur les quantités permises par le règlement.

En résumé, au Québec, les besoins en azote des différentes cultures déterminent actuellement la quantité d'engrais qu'il est souhaitable d'épandre. Sur un territoire donné, les superficies en culture disponibles pour l'épandage limiteraient théoriquement les producteurs dans leur capacité de production animale, du moins si rien n'était fait pour modifier les modes de production et de disposition des lisiers. En pratique, c'est la loi qui précise les capacités de réception des sols, précisant ainsi les capacités supports des régions. Toutefois, cette méthode d'évaluation de la capacité support ne tient pas compte de la variabilité des sols et de leur productivité inhérente, de leur aptitude intrinsèque à minimiser ou non les pertes d'éléments potentiellement polluants, ni de la diversité des pratiques agricoles, pas plus que des distances entre les lieux d'entreposage et des lieux d'épandage. Aussi, d'autres approches sont suggérées dans la littérature pour intégrer ces facteurs à la définition de la capacité support. Quelques unes seront exposées dans ce chapitre. Mais en premier lieu, les prémisses à l'utilisation des engrais de ferme en tant que fertilisants seront présentées en relation avec la productivité potentielle des sols. Cette qualité des sols détermine la capacité des sols à retenir et fournir à la plante les éléments nutritifs nécessaires à sa croissance.

---

<sup>17</sup> Cette norme ne tient pas compte du contenu des sols en phosphore et en potassium d'où les risques de surfertilisation dans certains cas.

## 2.1 L'utilisation des engrais de ferme comme fertilisants

Les engrais de ferme sont utilisés généralement pour augmenter la teneur en matière organique et améliorer les propriétés physiques du sol plutôt que pour leur valeur fertilisante. Une étude effectuée en Iowa, E.U., démontre en effet que seulement 49% des fermiers qui épandent des engrais organiques, diminuent leurs doses de fertilisants et que sur ce nombre, seulement 25% ajustent leur dose d'azote (Larson 1992). La surfertilisation<sup>18</sup> augmente certainement les risques de pollution des sols et de pollution de l'eau. Mais elle constitue également une non-reconnaissance de la valeur économique des engrais de ferme lorsque les producteurs de cultures ne tiennent pas compte de la fertilité du sol et des besoins des cultures. Ainsi, dans la région de Richelieu-St-Hyacinthe, plus de 74% des superficies en monoculture présentent des teneurs excessives en P et K (>500 kg/ha) sous forme assimilable dans les 40 premiers cm de sol (Tabi et al. 1990). Sur le bassin de la Beaurivage (Beauce), Simard et al. (1993) notent six fois plus de phosphore soluble dans la couche de surface des sols cultivés<sup>19</sup> que dans les sols forestiers d'une même série. Ils observent également des teneurs significativement plus élevées dans les horizons inférieurs (B et C).

Tel que précisé dans les volumes précédents, seule une rationalisation poussée peut corriger à la longue la détérioration du milieu engendrée par les activités d'épandage. La rationalisation des épandages doit tenir compte de nombreux facteurs, dont la nature du produit et le devenir des éléments dans les sols et leur recyclage par les plantes. Toutefois, la valeur fertilisante des engrais de ferme n'est pas constante et varie d'une ferme à l'autre et au cours de l'année, entre autres, selon le temps d'entreposage et les fluctuations thermiques. Elle est influencée par l'âge de l'animal, sa diète et le type de gestion des déjections. De plus, lors de la reprise pour l'épandage, l'homogénéité tant de la consistance que de la valeur fertilisante dépend du brassage du lisier en fosse. Lors du calcul de la quantité de lisier à appliquer en tant que fertilisant, l'utilisateur doit tenir compte de son efficacité comparée à celle d'un fertilisant minéral de référence. De surcroît, selon le mode et la période d'épandage, le lisier subit des pertes en éléments nutritifs par volatilisation de l'azote, par fixation du phosphore et du potassium ou par lessivage.

Le tableau 5 présente l'efficacité fertilisante du lisier de porc selon différents scénarios d'épandage. L'épandage à l'automne présente le plus haut risque de pertes puisque les plantes n'absorbent plus les éléments nutritifs et que le bilan hydrique est positif (précipitations - évapotranspiration > 0).

---

<sup>18</sup> La surfertilisation des sols correspond à l'application d'une dose excessive d'engrais par rapport à la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs et à celle des plantes à les recycler. Cette capacité dépassée, les nutriments en surplus seront lessivés vers les drains ou les eaux souterraines.

<sup>19</sup> Les échantillons provenaient de sols forestiers, de fermes laitières et de fermes en surplus d'engrais de ferme. Aucune différence significative n'est observée entre les fermes laitières et les fermes en surplus.

Tableau 5. Efficacité fertilisante du lisier de porc

Type de sol		N (kg/t)	NH <sub>4</sub> <sup>a</sup> (kg/t)	P (kg/t)	K (kg/t)
Composition moyenne		3.7	2.68	1.1	1.85
Coefficient d'efficacité		70%		80%	80%
Valeur fertilisante résultante <sup>b</sup>	Sable	2.56	1.84	0.88	1.77
	Autres	2.22	1.84	0.88	2.22
Indices selon le type de pertes					
Période d'épandage		N	Volatilisation	Fixation	Lessivage et fixation
Printemps enfoui	Sable	1.1	1.2	1	1
	Autres	1	1.2	1	1
Printemps non enfoui	Sable	1.1	1.4	1	1
	Autres	1	1.4	1	1
Été post-levé (par rampe)	Sable	1.1	1	1	1
	Autres	1	1	1	1
Automne enfoui	Sable	1.8	1.2	1.6	1.4
	Autres	1.4	1.2	1.6	1.1

Sources: L. Robert 1992, Comité ad hoc sur les fumiers 1992, D. Côté (communication personnelle 1994)

<sup>a</sup>La teneur en NH<sub>4</sub> équivaut à 72% de l'azote total.

<sup>b</sup>La valeur fertilisante égale la composition moyenne en NPK que multiplie le coefficient d'efficacité.

## 2.2 Azote: contribution du sol et apport des engrais de ferme

L'action fertilisante et polluante de l'azote est difficile à contrôler en raison a) du processus dynamique complexe de la transformation de l'azote (cycle de l'azote), b) de ses sources multiples (atmosphère, sol, engrais) et c) de son transport jusqu'aux eaux souterraines et de surface. Au Québec, la contribution en azote du sol varierait entre 30 et 120 kg N/ha/an selon les sols. Cette contribution est difficile à évaluer en raison du nombre de facteurs en cause tels que les propriétés du sol, les précédents culturels, les résidus végétaux et la capacité de minéralisation du sol. Celle-ci dépend de la température et de l'humidité du sol qui influencent l'activité microbienne du sol (Campbell 1984, Giroux 1988, Côté 1990, Myers, 1992, Simard 1993). Plusieurs auteurs rapportent de fortes corrélations entre les teneurs en azote du sol, les teneurs en carbone organique et celles en argile (Martel et Laverdière 1976, Tran et Giroux 1989, Côté 1990).

L'azote retrouvé dans les déjections se répartit en 1) une fraction inorganique disponible aux plantes au moment de l'épandage qui a un effet fertilisant direct, 2) une fraction organique qui se dégrade facilement et qui est disponible graduellement aux plantes durant la saison végétative, et 3) une fraction organique non dégradabile ou qui se dégrade très lentement. Cette dernière fraction a un effet à long terme sur la production végétale et peut s'accumuler dans le sol sur plusieurs années. Les lisiers de porc apportent surtout de l'azote immédiatement disponible aux plantes, sous forme ammoniacale (50% et 70%), mais ils sont pauvres en carbone organique. Lorsqu'ils sont incorporés au sol, les micro-organismes ont suffisamment d'azote pour métaboliser les protéines. Par contre, le carbone

est cependant limité comme source d'énergie. Les lecteurs peuvent également se référer aux volume 3 pour une représentation du cycle de l'azote.

Rappelons que les deux formes potentiellement polluantes ou volatiles, les plus solubles, sont l'azote ammoniacal et les nitrates. Ainsi, on peut poser que la capacité du sol à retenir l'azote épandu dépend principalement de sa capacité à retenir, d'une part, les cations ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ) et, d'autre part, les anions (nitrates,  $\text{NO}_3^-$ ). Les pertes de nitrates ont été traitées précédemment (lessivage). Pour sa part, la forme ammoniacale ( $\text{NH}_4^+$ ), cation facilement échangeable, tend à s'adsorber et à se fixer aux colloïdes du sol. Sa solubilité et sa mobilité dépendent de la capacité d'échange cationique (CEC). Les sols organiques mal drainés retiennent peu les cations en raison de leur acidité et de la saturation en eau. Par contre, les sols riches en argile et en matière organique retiendront bien les cations.

## 2.3 Phosphore: contribution du sol et apport par les engrais de ferme

On retrouve dans les sols plusieurs composés phosphatés<sup>20</sup>. Trois formes sont assimilables par les plantes : a)  $\text{PO}_4^{3-}$  en solution immédiatement disponible (environ 0.01%); b) le phosphore labile, assimilable après désorption de la surface des colloïdes présents dans le sol, par l'intermédiaire de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Al}^{3+}$ , et finalement, c) le phosphore non assimilable, fortement fixé aux colloïdes.

Le phosphore minéral compte pour environ 80% du phosphore total des lisiers de porc. Sa solubilité est élevée comme pour les engrais minéraux (Ziegler et Hédut 1991). Lorsque appliqué sur le sol, le phosphore soluble se fixe rapidement aux particules de sol auxquelles il est retenu plus ou moins fortement. Il tend à s'accumuler dans la couche de surface du sol et présente ainsi un risque de contamination pour les eaux de surface, risque proportionnel à la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique.

Les plantes puisent le phosphore (P) présent en solution dans le sol : sa concentration dépend des relations d'équilibre entre la solution du sol et le phosphore-particulaire dans le sol. Ainsi, la disponibilité du phosphore aux plantes sera proportionnelle à la teneur en P du sol et inversement proportionnelle à la capacité du sol à adsorber et à fixer le P (Tran et Giroux 1988). Par ailleurs, plus l'adsorption du P par les particules de sol diminue, plus les risques de migration du phosphore soluble sont grands (Gangbazo 1991, Simard et Lapierre 1990).

Toutefois, il existe une limite à la capacité d'un sol de fixer le phosphore soluble, limite qui dépend de ses propriétés physico-chimiques. La capacité de fixation du sol en phosphore est très variable d'un sol à l'autre; elle est surtout reliée à la teneur en oxydes ou hydroxydes

---

<sup>20</sup> Le phosphore peut être classé selon son état physique (particulaire ou dissous) ou chimique (inorganique et organique). Les formes de phosphore et les interprétations varient également selon les procédures d'analyse utilisées qui servent à le quantifier (Bray-2, Mellich, résines). La grande variabilité des propriétés du sol affecte la formation des composés phosphatés, ainsi que le pouvoir d'extraction des réactifs utilisés (texture, m.o., carbonates, Al, Fe). Par exemple, la méthode d'extraction Bray-2 fortement acide, dissout les composés apatites et les formes calciques très peu solubles et tend à surestimer la disponibilité du P dans les sols (Tran T.S. et Giroux M. (1990) "Relation entre les propriétés du sol et la disponibilité du phosphore à la plante", *Agrosol*, 3(1):7-12).

amorphes qui peuvent être extraits à l'oxalate d'aluminium et de fer (Tran et Giroux 1985, Simard et Lapierre 1990). Plusieurs auteurs estiment la capacité maximale d'adsorption d'un sol (CSP) par la relation suivante:  $CSP = 0,5 (Al_{ox} + Fe_{ox})$  (Van der Zee et al. 1986, Schoumanns et al. 1988). Le tableau 6 résume les principaux facteurs influençant la rétention du phosphore dans les sols relevés dans la littérature.

**Tableau 6. Facteurs influençant la capacité des sols de retenir le phosphore**

Facteurs	CRP		Explications
pH	↑	↓	Disponibilité du P, ↑ capacité de retenir les anions ↓
[Al <sub>ox</sub> ]	↑	↑	Fixation du P ↑
[Fe]	↑	↑	idem
[Ca]	↑	↑	Précipitation du P ↑
[Mg]	↑	↑	idem
% sable	↑	↑	Faible capacité de rétention, sauf si pH acide et [Al <sub>ox</sub> ] et [Fe] élevées
% argile	↑	↑	Surface spécifique ↑, rétention des cations ↑
% m.o.	↑	↓	P faiblement adsorbé, la décomposition de m.o. libère P
Podzol		élevé	Disponibilité du P ↓, fixation du P ↑
Gleysol		faible	
Brunisol et luvisol		moyen	
Température	↑	↑	Vitesse de réaction ↑, fixation de P ↑, capacité tampon ↑
Temps de contact	↑	↑	Fixation de P ↑
Fréquence des apports	↑	↓	Disponibilité du P ↑
Quantité apportée	↑	↓	Capacité d'adsorption et de fixation ↓

<sup>a</sup> Tran et Giroux (1985) rapporte que pour une même teneur en P Bray-2, la disponibilité du P aux plantes et la capacité d'adsorption varie en fonction de la teneur en aluminium extrait à oxalate.

Sources: Tisdale et Nelson 1975, Nelson et Logan 1983, Tran et Giroux 1985, Simard et Lapierre 1990, Miller 1990

## 2.4 Potassium: contribution du sol et apport par les engrais de ferme

Dans les sols, la quantité de potassium disponible aux plantes est relativement faible (1-2%) et sous deux formes : dissous ou adsorbé aux colloïdes du sol. L'équilibre relatif entre ces deux formes dépend des processus de diffusion et des caractéristiques physico-chimiques du sol. La capacité du sol à retenir le potassium dépend des mêmes facteurs que pour l'azote ammoniacal : une teneur en argile et une CEC élevées. Le potassium est surtout présent dans les urines et sous forme de sels minéraux, solubles à 80% dans l'eau (Ziegler et Heduit 1991). Ainsi, sa disponibilité aux plantes est similaire à celle des engrais minéraux.

La revue de littérature des deux premiers chapitres a permis de dégager les processus et les facteurs reliés à l'utilisation des engrais de ferme. La capacité de réception des sols à l'égard des engrais de ferme a été définie comme étant leur capacité à recevoir des engrais de façon à maximiser la productivité du sol sans causer de dommage à la nappe phréatique et au

cours d'eau. Au-delà de cette capacité de réception, les apports de nutriments à la rivière entraînent des dommages à l'écosystème aquatique dépassant la limite de ce qui est acceptable pour la population. De plus, l'usage en surabondance de nutriments organiques et inorganiques peut engendrer des dommages au sol (compaction, déséquilibre nutritif, acidification) et à la nappe phréatique (par accumulation de nitrate), ceux-ci détériorant l'avenir du producteur agricole. Pour sa part, la capacité support d'un sol ou d'une région exprime la capacité d'un sol ou d'une région de supporter une activité socio-économique donnée, sans que cette activité altère de façon indésirable l'environnement.

Le prochain chapitre présente différentes méthodes d'évaluation de la capacité de réception des terres agricoles. À partir de cette revue de littérature, une méthode sera retenue et permettra de développer un modèle d'évaluation de la capacité de réception des sols à partir des données pédologiques disponibles.



**Chapitre 3**  
**Évaluation de la capacité de**  
**réception des terres agricoles**





### 3. ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ DE RÉCEPTION DES TERRES AGRICOLES

---

Que ce soit pour l'établissement d'une norme d'épandage ou d'une taxe sur les rejets d'effluents d'élevage, toute alternative de contrôle de la pollution d'origine agricole exige la définition de la capacité support des sols ou d'une région (de préférence d'un bassin versant). Cette définition passe par l'évaluation de la capacité de réception ou celle l'aptitude des terres agricoles où l'aptitude exprime la capacité d'une terre à maintenir un type d'utilisation donné sans risque majeur de détérioration du site et des aires avoisinantes et ce, de façon rentable tout en justifiant les intrants requis pour cette utilisation. En outre, l'évaluation de l'aptitude des terres pour un usage donné s'impose puisque la terre est "une ressource limitée, aux usages multiples et qui réagit selon l'utilisation qu'on en fait" (Dumanski et al. 1987).

Aux chapitres précédents, on a vu que plusieurs facteurs doivent être pris en considération pour maintenir l'aptitude d'une terre à recevoir des engrais de ferme de façon viable. Le nombre et la diversité des facteurs à considérer expliquent la difficulté d'établir une norme nationale d'épandage pour les terres en culture. Or, l'évaluation des terres vise, d'une part, la compréhension des opportunités et des limitations<sup>21</sup> qu'offrent ces facteurs relativement permanents de l'environnement. Cette compréhension est essentielle pour toute décision concernant l'utilisation des terres, tant au niveau agricole qu'au niveau du développement urbain ou industriel. D'autre part, l'évaluation des terres traduit l'information disponible sur les terres sous une forme utilisable par les personnes intéressées à connaître les aptitudes et les possibilités des terres (McRae et Burnham 1981). Les cartes pédologiques sont généralement utilisées à cette fin.

Finalement, l'évaluation des terres agricoles est essentielle pour l'élaboration d'une politique de contrôle et permet de vérifier son efficacité et son applicabilité (van Lanen et al. 1992). Elle est également nécessaire aux étapes de sa mise en place et du suivi environnemental.

Les terres peuvent être évaluées de façon directe ou indirecte. L'évaluation directe ou empirique consiste à produire une culture ou autre usage et d'observer les rendements ou les impacts engendrés. Les résultats sont ensuite extrapolés à la région ou au type de sol. Cette méthode exige beaucoup d'informations et les résultats peuvent difficilement s'appliquer de façon universelle. Par conséquent, la plupart des systèmes d'évaluation sont indirects. L'hypothèse sous-jacente est que certaines propriétés du sol et du site influencent le succès d'un usage particulier de façon prévisible et que la qualité des terres peut être ainsi déduite à partir d'informations sur ces propriétés (McRae et Burnham 1981, Chénard et Nolin 1987).

Par exemple, Breeuwsma et al. (1986) évaluent la vulnérabilité des différents sols à la pollution des sols et des eaux. Puisque l'application de fumiers et de lisiers sur le sol contribue à la pollution des sols et des eaux, les auteurs définissent quantitativement les qualités des terres qui gouvernent le transport des polluants dans les sols. Ils dérivent trois

---

<sup>21</sup> Une limitation pour une utilisation donnée peut être permanente ou temporaire, c'est-à-dire corrigéable. Par exemple, le chaulage des terres est une mesure corrective envers l'acidité d'un sol.

propriétés significatives des sols de la zone non saturée, soit 1) le taux d'infiltration (susceptibilité à la pollution de la nappe), 2) la capacité d'échange cationique (transport des cations) et 3) la capacité de sorption du phosphate jugée importante suite aux épandages successifs d'engrais. Ces attributs sont estimés à partir d'informations issues d'enquêtes de sol (granulométrie, % m.o., % Fe et % Al extractible) que l'on retrouve généralement dans les rapports pédologiques des Pays-Bas.

Les méthodes d'évaluations indirectes peuvent définir des catégories (ou classes) ou peuvent permettre d'obtenir des indices sur une échelle continue à partir de la combinaison mathématique des descripteurs du sol et du site ou de la modélisation mathématique des processus impliqués. D'autres systèmes évaluent les terres selon leurs qualités ou selon leurs limitations. Ainsi, plusieurs approches à l'évaluation des terres sont proposées dans la littérature. Ce chapitre présente deux types d'approche : l'approche mathématique et l'approche déductive. Quelques exemples sont présentés ici pour illustrer différentes méthodes.

### **3.1 L'approche mathématique**

Les approches mathématiques regroupent les systèmes paramétriques et les modèles mathématiques dont il était question au volume 3. Plusieurs systèmes et outils informatiques ont été développés et pourraient être appliqués à notre problématique.

#### **3.1.1 Systèmes paramétriques**

Les systèmes paramétriques accordent un poids à chaque paramètre physique limitant l'aptitude d'une terre pour un usage donné ou qui intervient dans les processus de transport et d'atténuation des contaminants. La somme pondérée de ces paramètres peut fournir, par exemple, un indice de potentiel des sols agricoles (SPI) pour un usage donné. Le SPI tient compte des rendements des cultures et du coût des mesures de correction et des limitations permanentes. Cet indice s'exprime sous la forme mathématique suivante :  $SPI = P - (CM + CL)$  où P est l'indice de performance ou le rendement relatif au meilleur sol de la région, CM est l'indice des coûts rattachés aux mesures correctives entraînées par les limitations corrigéables et, CL, l'indice des coûts résultant de la perte attribuée par les limitations permanentes (Chénard et Nolin 1987).

Un premier exemple (tableau 7) présente une clé d'interprétation développée pour le calcul d'un SPI pour la production de maïs dans le comté de Cheshire au New Hampshire. S'inspirant de cette clé d'interprétation, Denholm (1987) a appliqué cette méthode d'indice de potentiel des sols pour l'estimation des rendements de maïs et d'orge pour certaines séries du sud-est de la plaine de Montréal.

Tableau 7. Clé d'interprétation pour la production de maïs, Comté de Cheshire

Caractéristiques de sol	Limites de classe <sup>a</sup>	Niveau de limitation	Point	Coefficient <sup>b</sup> de réduction
Perméabilité du profil	>15 cm/hr	faible	0	1
	0.5-15 cm/hr	modéré	15	1
	<0.5 cm/hr	élevé	19	0.99
Drainage	très rapide et rapide	faible	0	1
	bien et mod. bien	faible	0	1
	imparfait	modéré	0	1
	mal	élevé	16	0.98
	très mal	inapte	100	0
Pente <sup>c</sup>	<3%	faible	0	1
	3-8%	modéré	8	1
	8-15%	élevé	14	0.98
	>15%	inapte	100	0
Pierrosité	non pierreux à mod. pierreux	faible	0	1
	très pierreux	modéré	11	0.98
	extr. à excessivement pierreux	élevé	100	0
Profondeur du sol	>100 cm	faible	0	1
	50-100 cm	modéré	0	0.98
	<50 cm	élevé	100	0
Réserve en eau utile	>15 cm	faible	0	1
	7.5-15 cm	modéré	40	0.75
	<7.5 cm	élevé	80	0.50
Teneur en matière organique	sols minéraux	apte	0	1
	sols organiques	inapte	100	0

<sup>a</sup>Limites de classes adaptées à celles de SISCan (1982).

<sup>b</sup>Les coefficients de réduction des rendements sont basés sur le coût des mesures correctives

<sup>c</sup>Pour un facteur "K" d'érodabilité > 0.28.

Tableau 8. Clé d'interprétation pour l'épandage d'engrais de ferme

Caractéristiques de sol	Limites de classe*	Niveau de limitation	Point
Risque d'inondation	absent	faible	0
	présent	élevé	20
Fractions > 3"	<5%	faible	0
	5-30%	modéré	8
	>30%	élevé	10
Texture	Autres	faible	0
	ALi, A, AS	élevé	5
Pente	<5%	faible	0
	5-12%	modéré	4
	>12%	élevé	8
Profondeur du sol	>100 cm	faible	0
	50-100 cm	modéré	2
	25-50 cm	élevé	6
	<25 cm	très élevé	10
Drainage	très rapide et rapide	très élevé	10
	bien, modérément bien	faible	0
	imparfait	modéré	2
	mal	élevé	6
	très mal	très élevé	8
Productivité potentielle <sup>a</sup> (rendements potentiels)	inapte	faible	9
	peu apte	faible	8
	moyennement apte	moyen	4
	apte et très apte	élevé	0

Source: Heidlage et Shingleton (1984)

<sup>a</sup>Adapté pour le maïs-grain pour des fins de comparaison à partir des travaux de Denholm. Les auteurs utilisent les rendements potentiels du "Bermuda grass".

Dans le cadre d'un programme de contrôle de la pollution de l'eau, Heidlage et Shingleton (1984) ont développé un SPI pour l'est de l'État de l'Oklahoma aux prises avec un problème de dégradation de la qualité de l'eau en milieu agricole. Le but était d'établir la quantité maximale d'azote assimilable selon la capacité support des sols. Une valeur de 0 à 100 était attribuée pour chaque type de sol en considérant sept paramètres<sup>22</sup>. Ils ont ainsi regroupé les sols en trois classes selon les limitations qu'ils présentent à l'épandage des engrais de ferme (groupe I, SPI >90, groupe II SPI =80-90, groupe III, SPI <80). Pour chaque groupe de sols, une quantité maximale d'azote assimilable par culture a été établie. Depuis l'application du programme de contrôle de la pollution, le niveau d'azote dans les sols et dans les eaux s'est stabilisé. Le tableau 8 résume les critères d'évaluation utilisés pour le calcul du SPI.

### 3.2 L'approche déductive

L'approche déductive comprend les systèmes d'évaluation des possibilités d'utilisation agricoles des terres ou d'évaluation de l'aptitude des sols à partir desquels les terres peuvent être regroupées en catégories ou en classes. Les systèmes experts sont également inclus dans cette catégorie.

Certaines définitions s'imposent en ce qui a trait à l'évaluation des terres. Alors que les *possibilités* sont définies pour des usages généraux (agriculture ou développement urbain), l'*aptitude d'une terre* s'adresse à une utilisation<sup>23</sup> ou une technique d'aménagement spécifique (production de maïs, épandage de lisier, etc.) (McRae et Burnham 1981).

Chaque *terre* varie selon les éléments qui la caractérisent, soit tous les éléments de l'environnement physique tel que le climat, le relief, le sol, l'hydrologie et la végétation dans la mesure où ces derniers influencent le potentiel d'utilisation des terres. Ainsi, le *sol*, élément fondamental des terres, "n'est qu'un des facteurs environnementaux influençant la nature et l'usage d'une terre" (Chénard et Nolin 1987).

Une *caractéristique* de sol est une propriété que l'on peut mesurer en laboratoire ou observer sur le terrain. Dans les études pédologiques, la plupart des caractéristiques sont exprimées sous forme de classes, ceci permettant de rendre compte de la variabilité des unités cartographiques et de la précision des données. Des *caractéristiques "secondaires"* peuvent être déduites des caractéristiques plus élémentaires, habituellement disponibles dans la majorité des études pédologiques. Par exemple, la classe de drainage peut être déduite à partir de caractéristiques morphologiques, telles que la granulométrie, la profondeur au gley et la teneur en matière organique des couches superficielles.

Une *qualité du sol* est un attribut complexe qui agit différemment des autres qualités dans sa façon d'influencer l'aptitude d'une terre pour un usage donné. Sa définition tient compte

<sup>22</sup> En utilisant la somme des index les plus élevés de chaque critère d'évaluation (20+10+5+8+10+10+9=72), chaque unité équivaut à 1.389 ( $1/72 * 100 = 1.389$ ).  $SPI = 100 - (1.389 * \text{unités})$ . Pour un sol cumulant que 7 unités, l'index  $SPI = 100 - (1.389 * 7) = 90.3$ , donc ce sol se classerait dans le premier groupe.

<sup>23</sup> Un type d'utilisation des terres représente un ensemble de spécifications techniques dans un contexte physique et socio-économique donné.

des interrelations entre les facteurs. Ainsi, une qualité traduit les relations directes entre la terre, en tant que complexe écologique, et les activités biologiques et techniques de l'utilisation comme, par exemple, la disponibilité en eau, la facilité du travail du sol ou sa résistance à l'érosion. Dérivée à partir des caractéristiques des terres, une qualité peut servir de critère diagnostique (ou d'indicateur environnemental) dans l'évaluation de l'aptitude d'une terre ou encore, d'indicateur des améliorations nécessaires pour un usage donné (Vink 1975, FAO 1976, McRae et Burnham 1981, Chénard et Nolin 1987).

**Tableau 9. Clé d'interprétation pour l'épandage de boues**

Caractéristiques de sol	Limites de classe*	Niveau de limitation
Perméabilité de la couche de surface	>10 cm/hr	apte
	<10 cm/hr	inapte
Perméabilité de l'horizon B et C	0.5-15 cm/hr	apte
	<0.5 et >15 cm/hr	inapte
Drainage	très rapide	inapte
	rapide	apte
	bien et mod. bien	apte
	imparfait, mal, très mal	inapte
Pente	<5%	apte
	>5%	inapte
pH	6-8.4	apte
	<6.4 et >8.4	inapte
Profondeur du sol	>100 cm	apte
	<100 cm	inapte
Réserve en eau utile	>10 cm	apte
	<10 cm	inapte
Teneur en matière organique	<2%	inapte
	>2%	apte

Hall et al. (1976) tiré de Volk et Landa (1979)

**Tableau 10. Clé d'interprétation pour l'installation de champs d'épuration**

Caractéristiques de sol	Limites de classe*	Niveau de limitation
Perméabilité de l'horizon B et C	>5 cm/hr	faible
	>1.5 cm/hr	modéré
	<1.5 et >15 cm/hr	élevé
Risque d'inondation	absent	faible
	présent	élevé
Drainage	très rapide et rapide	faible
	bien, mod. bien et imparfait	faible
	mal	modéré
	très mal	élevé
Pente	<8%	faible
	<15%	modéré
	>15%	élevé
Pierrosité	non pierreux à mod. pierreux	faible
	très pierreux	modéré
	extr. à excessivement pierreux	élevé
Profondeur du sol	>180 cm	faible
	>100 cm	modéré
	<100 cm	élevé

Tiré de McRae et Burnham (1981)

Par exemple, McRae et Burnham (1981) déduisent à partir des caractéristiques des terres leur aptitude à l'installation de champs d'épuration de réservoir septique. Les critères utilisés sont similaires à ceux proposés par Hall et al. (1976) pour la sélection des sites aptes

à recevoir des boues provenant d'usine de traitement d'eau usée. Ces deux clés d'interprétation figurent aux tableaux 9 et 10. Les caractéristiques retenues correspondent à celles identifiées comme influençant les processus de pertes d'éléments nutritifs provenant de l'épandage d'engrais de ferme (tableau 4).

### 3.2.1 Système canadien d'inventaire des terres (ITC)

Le système de classification ITC (1965)<sup>24</sup> comporte sept classes de possibilités indiquant le degré des limitations (classe) et le type de limitations (sous-classe). L'intensité des limitations guident la classification des sols plutôt que le genre des limitations à la production agricole. Chaque classe comporte des sous-classes définies par les facteurs limitants<sup>25</sup>. Ce système est ultérieurement modifié par Marshall et al. (1979) pour les sols de région centrale des basse terres du St-Laurent, afin de "décrire plus précisément l'intensité des limitations sur lesquelles porte le classement" (M': limitation majeure, M: limitation modérée, m: limitation mineure). La somme des limitations et de leur importance détermine la classe. Ce système a été appliqué aux sols de la région sud-est de la plaine de Montréal. Les facteurs pédologiques limitants et les degrés de sévérité qui les définissent figurent à l'annexe 1.

### 3.2.2 Cadre d'évaluation proposé par la FAO

Le cadre proposé par la FAO (Soils Bulletin #32, 1976) offre une structure similaire à celle du système précédent. Il est basé sur l'évaluation du comportement des terres utilisées à des fins spécifiques, agricoles ou autres. Ce cadre est valide à plusieurs échelles de travail. Il permet d'évaluer l'*aptitude actuelle* d'un type de sol pour un type d'utilisation donné *et son aptitude potentielle* après amélioration. Par exemple, un sol peut être impropre à la production de maïs en raison de son mauvais drainage, mais peut devenir très apte suite à la pose de drains souterrains. Le système de classification de la FAO comporte quatre niveaux de généralisation : a) l'ordre d'aptitude, b) la classe qui indique le degré d'aptitude à l'intérieur d'un ordre, c) la sous-classe qui indique les types de limitation ou les principales améliorations nécessaires et finalement, d) l'unité d'aptitude qui indique les différences mineures à l'intérieur d'une sous-classe. Le tableau 11 illustre le système de classification proposé par la FAO.

La classe S1 regroupe les sols présentant aucune limitation à l'épandage, par exemple. Dans la classe S2, les sols sont **moyennement aptes**, c'est-à-dire que les limitations sont corrigibles à un coût acceptable par rapport aux bénéfices escomptés. Les sols **peu aptes** se classent S3 et présentent des limitations telles que le coût des mesures correctives est trop élevé. Les revenus attendus seraient alors nuls. Finalement, la classe N1 réunit les sols jugés **inaptes** en raison de limitations physiques permanentes incorrigibles (topographie, climat, etc.).

<sup>24</sup> Cette entreprise fédérale-provinciale est régie par la Loi ARDA (Agricultural Rehabilitation and Development Act).

<sup>25</sup> D: structure, F: fertilité, I: inondation, M: manque d'humidité, P: pierrosité, R: roccosité, T: relief, W: surabondance d'eau

**Tableau 11. Classification proposée par la FAO**

Ordre	Classe	Sous-classe	Unité
S (apte)	S1		
	S2	S2m	S2e-1
		S2e	S2e-2
		S2me etc.	etc.
	S3 etc.		
N (inapte)	N1	N1m	
		N1e	
		etc.	

Source: McRae et Burnham 1981

Ainsi, cette classification permet, d'une part, de faire le lien entre l'environnement physique et l'utilisation des terres et, d'autre part, de comparer les modes d'utilisations les plus prometteurs selon les critères diagnostiques retenus. L'évaluation peut se faire de façon qualitative (aptitude physique) ou quantitative (aptitude économique). L'évaluation physique met en évidence les aptitudes relatives d'un ensemble d'unités de sols pour un ou plusieurs types d'utilisation. Si un seul type d'utilisation est considéré, l'évaluation physique permet de comparer de façon très satisfaisante les aptitudes des différents sols. Souvent utilisée pour l'analyse de risques, elle se présente sous forme de matrice d'aptitudes par type d'utilisation. Elle permet de regrouper les terres suivant le type de contraintes ou autres qualités des terres. De plus, elle aide à choisir les techniques agricoles appropriées en vue de maximiser les bénéfices attendus de l'utilisation d'une terre.

Par exemple, l'épandage de lisier de porc sur des terres agricoles exige des conditions de mécanisation (qualité de sol) qui permettent le travail du sol et le passage de machinerie lourde (citernes). Pour des terres ayant une pente variant de 8 à 15% et un sol très pierreux (caractéristiques de sol), les conditions de mécanisation sont très limitantes compte tenu de l'impossibilité de labourer (pierrosité), des risques de verse de la machinerie et de l'énergie supplémentaire qu'exige la topographie. Ainsi, cette terre serait classée inapte à recevoir du lisier (aptitude). Par contre, d'autres utilisations du sol, moins exigeantes sur le plan des qualités de sol, peuvent s'avérer plus rentables pour le producteur (pâturage).

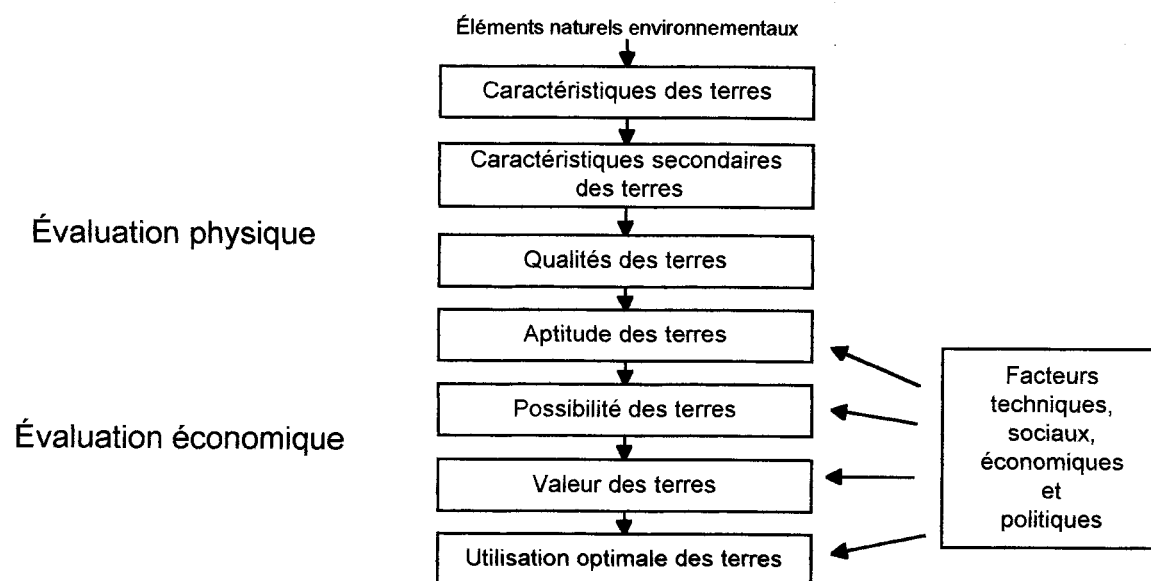
Si différents types d'utilisation des sols doivent être comparés, une base commune de comparaison est requise. Dans ce cas, l'évaluation économique (coûts et revenus) s'avère utile, car elle permet une comparaison des différents types d'utilisation sous un même dénominateur (\$) et d'optimiser l'utilisation des sols en tenant compte de facteurs sociaux et culturels, tels que les pratiques agricoles ou les objectifs de qualité de l'eau.

Ainsi, le cadre proposé par la FAO permet non pas de définir la "capacité support" des sols de façon déterministe mais, plutôt, il met en évidence les conséquences sociales, comme la pollution, et les conséquences économiques des diverses utilisations du sol selon les qualités intrinsèques de celui-ci. La figure 3 résume les étapes de l'évaluation indirecte proposée par la FAO.



### 3.2.3 Le système-expert

Le système expert offre une alternative intéressante pour résoudre certains problèmes où les connaissances sont en constante évolution et que les données disponibles sont incomplètes. Tel que mentionné précédemment, un programme mathématique traite des variables numériques en suivant systématiquement un processus algorithmique. Les résultats obtenus peuvent s'avérer inexacts si le programme ne dispose pas de toutes les données. Contrairement aux modèles mathématiques qui fournissent une solution déterministe à l'estimation de la capacité support, le système expert permet une évaluation qualitative ou semi-quantitative de l'aptitude des sols à supporter un usage donné. Il assemble de façon flexible les connaissances, l'expérience et le jugement des experts en la matière sous forme de décisions logiques (Lein 1991, Rossiter 1992). L'ensemble des décisions logiques (arbres de décision) forme le moteur d'inférence entre les connaissances et la base de données. Ainsi, les connaissances et le raisonnement sont systématiquement séparés dans le programme et il est possible de suivre toutes les étapes du raisonnement (Rémy 1990).



Adapté de McRae et Burnham 1981

Figure 3. Étapes de l'évaluation des terres proposée par la FAO

Van Lanen et al. (1992) utilisent cette approche pour évaluer l'aptitude physique des sols pour l'injection du lisier de porc comme mesure de contrôle de la pollution de l'air. Les superficies disponibles sont estimées à partir de l'information pédologique. Leurs résultats révèlent que 40% des sols de la région à l'étude permettaient l'injection du lisier. Ces superficies ont été jugées comme insuffisantes pour l'établissement d'un règlement obligeant l'injection du lisier afin de minimiser les pertes par volatilisation. Ainsi, cette approche leur a permis d'évaluer rapidement l'applicabilité d'une mesure de contrôle de la pollution aux Pays-bas.

### 3.2.4 L'outil informatique ALES

Le logiciel ALES ("Automated Land Evaluation System") répond bien aux exigences de l'évaluation indirecte. Il a été conçu spécifiquement pour l'évaluation des terres selon le

cadre proposé par la FAO (Soils Bulletin #32, 1976). Il offre une structure permettant de créer des modèles d'évaluation des unités cartographiques. Les unités cartographiques (UC) sont d'abord évaluées selon leurs aptitudes physiques et regroupées en classes d'aptitude (S1, S2, S3, N1). Seules les classes S1 et S2 peuvent être évaluées économiquement<sup>26</sup> par ALES. Car, les sols de la classe S3 sont considérés comme non propices en raison des coûts des mesures correctives nécessaires trop élevés pour justifier le type d'utilisation et les sols classés N1 sont inaptes physiquement à ce type d'utilisation.

ALES est un logiciel opérant comme base de données, moteur d'inférence et producteur de rapports, avec des capacités d'interactions avec d'autres logiciels courants (tableurs, gestionnaire de données, système d'information géographique). Il ne contient aucune liste de critères ou de caractéristiques des sols. Ses principales composantes sont: 1) une structure supportant la base de connaissances concernant les types d'utilisation; 2) une autre pour la base de données pédologiques, les intrants nécessaires (semences, engrais, etc.) et les extrants (maïs, pertes de nutriments); 3) un mécanisme de déduction permettant de relier la base de connaissances et la base de données et calculant les aptitudes physiques et économiques des unités cartographiques retenues (arbres de déduction); 4) une option explicative qui permet de revoir et perfectionner rapidement les arbres de décision ou de corriger la base de données si nécessaire; 5) un module permettant l'impression de rapports ou l'exportation des résultats vers d'autres logiciels tels que des bases de données (ex. Excel, DBase) et des systèmes d'informations géographiques (SIG). Une interface a d'ailleurs été conçue avec le SIG Idrisi.

### Traitement de la variabilité des sols

ALES est conçu pour évaluer des unités cartographiques dont la variabilité des caractéristiques est exprimée sous forme de classe. Aussi, cette variabilité est-elle considérée selon l'approche centrale où la moyenne, l'écart-type et l'étendue des observations sur une série de sols déterminent la classe attribuée à une caractéristique de sol. Le nombre de classes et leurs limites dépendent de la précision recherchée et de celle qu'offrent les données disponibles. Les unités cartographiques composées<sup>27</sup> peuvent également être d'évaluées selon la proportion de superficie attribuée aux différentes séries de sol qui les composent (70% Providence, 30% St-Urbain).

Ales traite a) les *caractéristiques discrètes ordinales*, par exemple, les classes de pente des rapports pédologiques (0-3%, 3-5%, 5-9% etc.), b) les *caractéristiques discrètes nominales* sans unité de mesure comme, par exemple, le type de matériau parental, c) les *caractéristiques sur échelle continue*.

Quatre méthodes permettent de déduire une caractéristique de sol à partir d'autres caractéristiques ordinales ou non.

---

<sup>26</sup> Deux types d'évaluation économique s'offrent à l'utilisateur de ALES: l'analyse du cash-flow escompté et celle de la marge brute (Rossiter et al. 1992). Les facteurs intervenant dans ce calcul sont la valeur nette actuelle prévue et le rapport bénéfices/coûts des intrants (dépenses) et extrants (recettes). La valeur actuelle égale les liquidités \*  $[100/(100+\text{taux d'escompte})]^{\text{nombre d'années du projet}}$ . La marge brute prévue pour chaque "paire type d'utilisation-unité cartographique" est mesurée en \$/ha/an, c'est-à-dire que les cash-flows de toute la durée du projet sont recalculés sur une base annuelle.

<sup>27</sup> Unités composées de plusieurs types de sol (Coen 1987).

- 1) Lors de la définition d'une caractéristique discrète, il est possible d'établir un lien d'inférence automatique avec une caractéristique continue de même unité. Par exemple, une pente de 4% sera classée dans la deuxième classe (3-5%).
- 2) Une caractéristique peut également être déduite à partir d'une autre (nominale ou ordinale) à l'aide d'un arbre de décision. Ainsi, une caractéristique plus subjective (secondaire) peut être déduite à partir de plusieurs autres caractéristiques. Cette méthode s'avère utile lorsque les données de sol manquent (par exemple, réserve en eau utile, drainage). Aussi, elle permet de réduire la complexité des arbres de décision des qualités de terres ou des limitations.
- 3) Un lien d'inférence peut également être établi entre deux caractéristiques ordinales de même unité, mais dont les limites de classe diffèrent. Par exemple, si les limites de classe des données de pente présentées dans les rapports pédologiques sont 0-3%, 3-8%, 8-15%, 15-30%, >30% et les limites de classe utilisées dans le modèle ALES sont 0-5%, 5-12%, 12-25%, >25%, ALES assume que les sols sont distribués uniformément dans les classes. Par exemple, pour une unité cartographique ayant une pente qui varie de 5-15%, ALES assume que 30% des sols (8-5/15-5) sont dans la classe 3-8% et que 70% (15-8/15-5) sont dans la classe 8-15%. Il peut résulter que seulement une proportion de cette unité cartographique (70%) présente de sévère limitation à l'épandage de lisier. Cette méthode d'interpolation linéaire s'applique également pour les unités cartographiques composées.
- 4) Des algorithmes mathématiques peuvent aussi servir pour déduire une caractéristique continue à partir d'une ou plusieurs autres caractéristiques continues. Peuvent être utilisées des constantes, des variables (% argile), des opérateurs binaires arithmétiques (/ \* + - \*\*) ou logiques (= (EQ), etc.), des fonctions mathématiques (ABS, LOG, etc.) ou l'opérateur conditionnel IF. Par exemple, la CEC pourrait être déduite par la formule suivante:  $CEC = 2 + 0.25 * \% \text{ argile} + 1.6 * \% \text{ m.o.}$  Cette méthode permet d'utiliser les algorithmes mathématiques suggérés dans la littérature afin de comparer les résultats déduits.

Dans un modèle ALES, les arbres de décisions permettent de tenir compte des interactions entre les qualités des sols. Par exemple, l'évaluation des risques de lessivage tient compte de trois qualités: la capacité d'infiltration du sol, sa capacité à retenir l'eau et sa capacité à retenir les éléments nutritifs. Il est également possible de pondérer l'effet des qualités de sol si elles sont indépendantes les unes des autres. Deux méthodes sont disponibles: 1) celle du coefficient de rendement proportionnel qui affecte de façon multiplicative les rendements et 2) celle du coefficient de limitation de rendement, basée sur la loi du minimum où le facteur le plus limitant affecte le rendement.

En résumé, un modèle "ALES" focalise 1) sur les qualités de sol requises ou les besoins pour un usage particulier et 2) sur les impacts de la non-rencontre des exigences pour cet usage, impacts tant environnementaux qu'économiques. Le degré ou niveau de restriction pour un usage peut être estimé par une ou plusieurs qualités. Le nombre de niveaux détermine la précision recherchée par l'évaluation et celle permise par les données disponibles.

### **3.3 Élaboration d'un modèle d'évaluation**

Que ce soit selon une approche mathématique ou déductive, un modèle d'évaluation de l'aptitude des terres se bâtit de façon itérative et en interaction avec les experts. Les principales étapes sont les suivantes:

- 1) choisir un ou plusieurs types représentatifs d'utilisation des terres;
- 2) établir leurs exigences en sol selon les connaissances des experts (revue de littérature);
- 3) vérifier quelles caractéristiques de sol sont disponibles pour former la base d'évaluation;
- 4) construire les algorithmes mathématiques ou les arbres de décisions qui permettent de relier les caractéristiques des sols aux types d'utilisation;
- 5) rassembler les paramètres économiques;
- 6) sélectionner quelques unités cartographiques représentatives et bien documentées;
- 7) rechercher et saisir les données sur les caractéristiques de ces unités cartographiques;
- 8) effectuer l'évaluation;
- 9) valider le modèle auprès des experts;
- 10) apporter les corrections nécessaires;
- 11) appliquer le modèle sur l'ensemble de la base de données géographique de la région considérée.

### **3.4 Synthèse**

Des méthodes plus ou moins complexes d'évaluation existent et pourraient être appliquées ou adaptées à l'évaluation de la capacité de réception des terres agricoles. Plus spécifiquement, cette capacité de réception fait référence à **l'utilisation des terres agricoles pour le recyclage des déjections animales en tant que fertilisants par leur épandage sur ces terres**. Le choix d'une méthode repose sur plusieurs critères tels que la précision et la fiabilité de données disponibles ou les coûts de leur acquisition et leur traitement, l'échelle spatiale optimisant le contrôle de la pollution et son suivi, l'acceptation de la méthode par les acteurs impliqués (pollueurs, pollués, contrôleur).

Les éléments discutés dans ce chapitre et les précédents suggèrent qu'il soit possible d'identifier un lien indirect entre la capacité support des sols pour les productions animales, le potentiel de recyclage des engrais de ferme et les relations "épandage-pollution". En effet, si les cultures offrent un potentiel de "recyclage" des engrais de ferme, le sol joue également un rôle de réservoir-tampon en transformant et retenant les éléments potentiellement polluants. Une définition précise de ce lien "épandage-pollution" s'impose en tant qu'information de base pour le développement de politique de contrôle efficace de la pollution diffuse.

Par contre, les coûts privés et publics engendrés par l'application d'une politique de contrôle de la pollution (ceux-ci incluant les coûts d'acquisition et de traitement des données nécessaires à la définition des relations "épandage-pollution") pourraient rapidement

dépasser les bénéfices attendus par l'application de mesures de contrôle de la pollution, si une préoccupation de minimisation des coûts n'était pas présente<sup>28</sup>.

Dans le cas de l'étude des relations "épandage-pollution", il est possible de réduire considérablement les coûts de l'acquisition et du traitement des données en utilisant les données déjà existantes comme celles fournies par les rapports pédologiques. C'est la perspective adoptée dans le présent travail : on y propose une méthode permettant de tenir compte du facteur "sol" dans l'estimation des superficies disponibles pour l'épandage d'engrais de ferme qui exploite des données existantes et accessibles. Cette méthode consiste à l'évaluation de la capacité intrinsèque du sol à soutenir de telles activités de disposition des effluents d'élevage et indirectement, l'évaluation de la capacité support des sols pour des productions animales utilisant ces méthodes de disposition. Concrètement, il s'agit d'identifier les limites possibles à un usage du sol, c'est-à-dire son aptitude à recycler les éléments nutritifs et à jouer un rôle de tampon, protégeant ainsi les eaux souterraines et les cours d'eau.

Le cadre d'évaluation des terres proposé par la FAO, l'approche système expert et le logiciel ALES ont été retenus à cette fin. Ils ont été privilégiés pour plusieurs raisons :

- 1) l'absence actuelle de données précises limite l'application de modèles mathématiques à des bassins versants où l'on dispose de l'information nécessaire, de même la difficulté d'établir empiriquement un lien direct entre la quantité d'engrais organique épandue sur une parcelle et la pollution retrouvée dans les eaux de surface et souterraines fait ressortir l'intérêt méthodologique pour l'évaluation indirecte de cette relation à partir de propriétés des sols relativement stables ;
- 2) le système expert permet une adaptation rapide à l'évolution constante des connaissances actuelles, connaissances incertaines ou incomplètes;
- 3) le système s'adapte également à l'échelle géographique visée compte tenu de la précision des données disponibles, cette flexibilité rendant possible l'utilisation du modèle à différentes échelles géographiques; de plus, il est facile d'intégrer des connaissances provenant de plusieurs domaines et de tenir compte de la complexité des phénomènes;
- 4) enfin, la simplicité de l'approche permet d'atteindre rapidement l'objectif de classification fixé dans ce projet de recherche.

Les connaissances actuelles sur les processus et les caractéristiques du sol influençant le devenir des éléments nutritifs dans les sols seront synthétisées sous forme d'arbres de

---

<sup>28</sup> *Idéalement, le niveau des efforts de contrôle de la pollution diffuse devrait se situer au point où le coût marginal d'application de la politique de contrôle est égal au bénéfice marginal qui en est retiré. En pratique, il est difficile de situer ce point d'équilibre, et l'on tentera plutôt de minimiser les coûts d'application de la politique, tout en s'assurant qu'elle produit des résultats acceptables.*

décision. Ces arbres seront basés sur les relations retrouvées dans la littérature entre les phénomènes impliqués et les propriétés du sol qui les définissent.



# **Chapitre 4**

## **Méthodologie**





## 4. MÉTHODOLOGIE

---

Dans la première partie du présent travail, la revue de littérature a dégagé les processus et les facteurs impliqués dans la pollution issue des activités d'épandage d'engrais de ferme. Sur la base de ces connaissances et des exemples d'évaluation de terres agricoles présentés, il est possible d'évaluer de la capacité de réception des terres agricoles à partir des caractéristiques intrinsèques des sols. Cette information s'avère essentielle pour l'élaboration et la mise en place d'une mesure de contrôle de la pollution d'origine agricole. La prochaine partie propose une méthode d'évaluation de cette capacité de réception et permettant la classification des sols. Le développement de ce modèle et les résultats obtenus seront présentés aux chapitres 5 et 6. Le présent chapitre discute de la région étudiée et des types d'utilisation des terres représentatifs retenus ainsi que des raisons motivant ces choix.

### 4.1 Région à l'étude

Le sud-est de la plaine de Montréal a été retenu comme région d'étude pour plusieurs raisons. Des études pédologiques récentes détaillées à l'échelle cartographique du 1:20,000 fournissent des informations pédologiques précises et fiables, tant au niveau des propriétés physiques des sols que de leurs propriétés chimiques (Nolin et Lamontagne, 1991). Pour un grand nombre de descripteurs pédologiques, des paramètres statistiques sont disponibles (moyenne, écart-type, intervalle de confiance, étendue, etc.). Ainsi, il sera possible de valider ultérieurement les résultats du modèle d'interprétation proposé avec des données observées et mesurées comme, par exemple, la capacité d'échange cationique ou le drainage.

À cette échelle spatiale, les unités cartographiques<sup>29</sup> sur une carte pédologique désignent des portions de paysages pédologiques ayant des attributs variant entre des limites bien définies, plus ou moins étroites (Baril 1986) déterminées par la densité de la prospection. Celle requise à l'échelle du 1:20 000 et l'homogénéité relative des sols de cette région assure la fiabilité de l'information pédologique provenant des rapports pédologiques utilisés dans la présente étude.

En outre, les unités cartographiques ont été nommées d'après leur principale composante, soit la série de sols dominante. Or, le système de classification taxonomique des sols utilisé au Canada<sup>30</sup> se base sur la variabilité verticale du profil. Les séries de sols sont différenciées selon leur stratigraphie, le type et le processus de transformation pédologique ou anthropique. Puisque la précision des modèles de transfert et de transport des solutés dans les sols est affectée 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 les objectifs visés par cette étude. La série regroupe les sols formés à partir d'un matériau originel particulier et possédant un nombre et un arrangement semblables d'horizons dont

---

<sup>29</sup> Une unité cartographique comprend toutes les délimitations contenant le même symbole cartographique.

<sup>30</sup> Comité d'experts sur la prospection pédologique d'agriculture Canada 1983

les propriétés, à l'exception de la texture de la couche de surface, ne varient qu'entre certaines limites établies.

Ainsi, pour la définition de la "capacité de réception des sols", l'échelle du 1:20 000 permet d'utiliser des indicateurs communs aux agriculteurs et aux planificateurs (la superficie minimale visible sur la carte est de 1,2 ha). De plus, Cipra et al. (1972) ont observé que la variation des propriétés du sol entre les pédon contribuait peu à la variation totale de la série. Par contre, elle contribuait beaucoup à celle entre les parcelles. Ils concluent que peu de relations existent entre le rendement des cultures et les propriétés du sol, *si on ne tient pas compte des différences pédologiques à l'intérieur des parcelles*. La variabilité entre les champs était encore plus grande en raison des différentes cultures et de différents modes de gestion des sols. Par ailleurs, Nolin et al. (1991) ont observé que la variabilité des descripteurs différait significativement avec le mode de déposition du matériel parental. Elle diminuerait avec l'augmentation du contenu en argile. Aussi, la variabilité des propriétés intrinsèques du sol (texture, CEC) est moins élevée que celle des propriétés influencées par les aménagements (teneur en P Pass., K éch. ou Mg éch.).

Une carte illustre la position géographique du sud-est de la plaine de Montréal dans le Québec méridional à l'annexe 2. Les comtés couverts par ces études sont ceux de Richelieu, Verchères, St-Hyacinthe et Chambly (208 000 ha). Le relief est généralement plat (pente de 0-3%) à l'exclusion des montérégiennes. L'agriculture y reste prépondérante malgré les pressions exercées par le développement urbain et industriel de Montréal au sud et de Sorel et Tracy au nord. Les productions agricoles se sont spécialisées au niveau des cultures commerciales, principalement les grandes cultures (maïs-grain, blé, orge, soya), les cultures industrielles et horticoles et également au niveau de l'élevage intensif. La maximisation des rendements des productions agricoles se traduit par l'intensification des moyens tels que le drainage souterrain, la taille de la machinerie, l'utilisation accrue de pesticides et fertilisants et la monoculture intensive.

**Tableau 12. Importance des activités agricoles du sud-est de la plaine de Montréal**

<b>Superficies</b> (hectares)	Totale de la région	208 000	100%
	Fermes	130 000	62%
	Sols cultivés drainés	57 000	44%
	Superficie boisée		20%
<b>Grandes cultures</b> (hectares)	Blé	17 000	13%
	Orge	9 000	7%
	Avoine	3 000	2%
	Maïs-grain	40 600	31%
<b>Production animale</b>	Bovins	40 000	40 000 UA <sup>a</sup>
	Vaches laitières	20 000	20 000 UA
	Porcs	100 000	20 000 UA
	Volailles	1 128 000	7 000 UA

<sup>a</sup>Unité animale

Adapté de Nolin et al. 1991

Le tableau 12 résume les données statistiques de 1986 concernant les principales productions. Les chiffres ont été arrondis et le nombre d'animaux selon le type traduit en unité animale, selon le règlement Q-2, r.18. pour faciliter la comparaison. Le climat du sud-est de la plaine de Montréal est le plus clément de la province. La longueur de la saison de croissance est d'environ six mois, soit 200 jours et plus et s'étend de la mi-avril au début novembre. La somme des degrés-jours, où la température de l'air est supérieure à 5°C, est d'environ 2,000 et de 1,000 degrés-jours pour une température seuil de 10°C (Nolin et al. 1991). Le tableau 13 présente les données climatiques saisonnières de cette région.

**Tableau 13. Données climatiques saisonnières du sud-est de Montréal**

Saison	Précipitations moy. mensuelles	Température de l'air moy. mensuelle	Température moy. du sol à 50 cm
Printemps	78 mm et fonte du couvert nival	12°C	8-15°C
Été	95 mm	18°C	15-22°C
Automne	83 mm	5°C	8-15°C
<i>Total</i>	environ 1,000 mm/an		

La roche mère est constituée de strates légèrement inclinées de roches sédimentaires (schiste, calcaire, grès). Les sols de cette région se sont développés sur des matériaux mis en place pendant et surtout après la mer de Champlain. La dernière prospection pédologique (1975-1992) a permis d'identifier 102 taxons (séries et variantes), regroupés selon leurs propriétés morphologiques et physico-chimiques (granulométrie, profondeur du sol, pH et contenu en carbonates). Les sols sont généralement profonds et l'ordre gleysolique domine à 90%. Les facteurs intrinsèques des sols limitant l'agriculture sont le mauvais drainage et, pendant l'été, un léger déficit en eau (tableau 14).

**Tableau 14 Caractéristiques des sols de la plaine de Montréal**

	Nombre de séries	Superficie (ha)	Pourcentage de la superficie totale inventoriée "sol"
<i>Ordre</i>			
Gleysols	71	157 175	89,3%
Podzols	12	14 605	8,4%
Sols organiques	9	2 402	1,4%
Brunisols	8	1 633	0,9%
<i>Texture</i>			
Sols argileux	30	76 734	45%
Sols loameux	36	43 062	25%
Sols sableux	17	51 689	30%
<i>Réaction</i>			
Neutres	60	112 633	64%
Alcalins	21	49 851	29%
Acides	12	11 118	7%

Tiré de Nolin et al. 1991

Quatorze unités cartographiques de sols ont été retenues pour le développement du système-expert. Elles diffèrent au niveau de la texture, de l'ordre taxonomique, de la perméabilité, de la pente, etc. pour s'assurer que le système répond à plusieurs types de sol, malgré l'homogénéité relative des sols de la région. Leurs caractéristiques retenues dans la base de données du système figurent à l'annexe 3.

## **4.2 Types d'utilisation des terres retenus**

Selon le règlement actuel (Q-2r.18), l'épandage d'engrais de ferme ne peut se faire que sur des terres cultivées. Ce règlement exige des éleveurs de posséder (ou louer) les superficies nécessaires pour l'épandage de leurs déjections animales. Les cultures à haut rendement tel que le maïs offre un potentiel de recyclage intéressant puisque leurs exigences en éléments nutritifs sont élevées. Aussi, la culture retenue pour cette étude est le maïs-grain compte tenu de son importance dans la région étudiée (31% de la superficie cultivée).

Tant au point de vue économique qu'agronomique, il existe un avantage certain d'utiliser les engrais organiques comme fertilisant au lieu d'engrais minéraux. En plus d'être très riches en éléments essentiels assimilables, les engrais de ferme contiennent également plusieurs autres éléments mineurs (Ca, Mg, Cu, Zn, etc.) (Côté 1994). Dans une étude de cas de la ferme Choplin en Caroline du Nord, Huisingh et al. (1986) rapportent des économies de 8 000.\$ par année en coûts de fertilisants minéraux par l'utilisation du lisier de porc produit sur la ferme. De plus, le recyclage des déchets agricoles (lisier et résidus végétaux) combiné à des pratiques de conservation des sols et de l'eau ont permis des économies annuelles de 107 000.\$.<sup>31</sup>

La production de porc de la région de St-Hyacinthe représente 34,4% du marché québécois, ce qui représente près de 12% des fermes et en fait la plus importante région productrice (Tabi et al. 1990). Dans ce travail, le lisier de porc sera retenu comme fertilisant organique en raison de l'importance de ce type d'élevage et des surplus de lisier engendrés.

### **4.2.1 La production de maïs-grain: exigences et potentiel de recyclage**

La production de maïs-grain exige certaines conditions climatiques et pédologiques. La saison de croissance minimale doit être de 130 à 140 jours. Un minimum de 2500 UTM est nécessaire pour assurer la maturation du grain, tout dépendant de la variété utilisée. Il s'agit d'une plante sensible au stress hydrique, et au moins 50 cm d'eau sous forme de précipitations est requis pendant la saison de croissance. Ces exigences sont satisfaites par les conditions climatiques de la plaine de Montréal. Au niveau pédologique, tous les sols minéraux pourvus d'un bon drainage se prêtent à la culture du maïs-grain. Le sol doit permettre un semis hâtif tout en assurant une bonne disponibilité en eau. De plus, la machinerie doit pouvoir circuler facilement. Ainsi, les sols trop minces et à très faible réserve en eau utile ou les sols trop pierreux sont impropres à la production de maïs-grain.

Quant aux besoins en fertilisants, le Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) recommande 120 à 170 kg d'azote à l'hectare selon la zone climatique, dont 20 à 50 kg/ha

---

<sup>31</sup> Sur une période de 6 ans, la perte en matière organique a été réduite de 670%, les pertes en N total de 490% et celles en P total de 525%. Les rendements en maïs ont augmenté de 300%.

lors du semis. Les doses recommandées en phosphore et potassium par le CPVQ (1994) figurent au tableau 15.

**Tableau 15. Recommandations en P et K pour le maïs-grain**

Analyse de sol (kg/ha) en phosphore (P)		Recommandations (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)
Pauvre	0-30	90-120
	31-60	70-90
Moyen	61-90	60
	91-120	50
Bon	121-150	40
Riche	151-250	30
Excessivement riche	>250	20
Analyse de sol (kg/ha) en potassium (K)		(kg K <sub>2</sub> O/ha)
Pauvre	0-50	205
	51-100	185
Moyen	101-150	170
	151-200	140
Bon	201-250	120
Riche	251-500	40-60
Excessivement riche	>500	0-20

Source: Grilles de référence en fertilisation, CPVQ 1994

### Potentiel de recyclage par le maïs

Les rendements en maïs-grain peuvent être utilisés pour représenter le potentiel de recyclage des éléments nutritifs par les plantes et leur exportation possible hors du bassin versant. Pour un sol, un climat et un niveau de gestion des sols<sup>32</sup> donnés, le rendement potentiel peut être considéré comme peu variable dans le temps et être estimé (Tang et al. 1992). Il est alors possible d'évaluer le potentiel de recyclage de NPK en se basant sur l'évaluation de l'aptitude des sols à produire du maïs-grain que fournit une estimation des rendements potentiels pour le maïs-grain. Par exemple, un sol offrant un plus faible rendement sera moins apte à recevoir du lisier de porc (le potentiel de prélèvement par la plante étant moindre). Il est à noter cependant que le potentiel d'exportation réel de NPK hors de la ferme se limite à la quantité d'éléments prélevés par les grains récoltés, le reste de la plante étant laissé au champ après la récolte.

Dans une étude des effets des différents systèmes culturaux, Giroux (1991) a observé pour le maïs-ensilage des prélèvements en azote de 104 kg/ha dans une parcelle en monoculture et sans fertilisation. Dowry et al. (1992) rapporte des prélèvements annuels de 100 à 150 kg/ha/an pour l'azote et de 20 à 40 kg/ha/an pour le phosphore par les cultures à haut rendement comme le maïs. Selon le CPVQ (1990), le prélèvement approximatif du maïs-grain est d'environ 27.9 kg par tonne (kg/t) pour l'azote, 10.6 kg/t pour P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 21.6 kg/t

<sup>32</sup> Labour, apports en fertilisants et pesticides, etc.

pour  $K_2O$ . Si le rendement moyen du maïs dans la région est de 7.2 t/ha<sup>33</sup>, la culture prélèverait environ 200 kg/ha d'azote<sup>34</sup>, 33 kg/ha de phosphore<sup>35</sup> et 129 kg/ha de potassium<sup>36</sup>. Ces résultats sont dans le même ordre de grandeur que ceux relevés par Dowry et al. (1992). Giroux (1991) estime que 70% de l'azote et du phosphore prélevé par le maïs se retrouve dans l'épi et 30% du potassium. Le potentiel d'exportation hors du bassin serait alors de 140 kg N, 23 kg P et 38 kg K par hectare cultivé en maïs.

#### 4.2.2 Utilisation du lisier de porc comme fertilisant

Afin de minimiser les risques de pollution, l'estimation des doses de lisier de porc à épandre doit tenir compte des risques de pertes et de l'efficacité fertilisante du produit, tel que vu au deuxième chapitre. La revue de littérature et une enquête auprès des experts a permis de définir quatre scénarios d'épandage jugés comme étant réalistes pour la région étudiée. Ces scénarios permettront d'évaluer et classer les unités cartographiques selon la capacité intrinsèque des sols à recevoir du lisier de porc, puisqu'ils maintiennent constants les facteurs externes au sol (mode et période d'épandage, travail du sol).

Trois périodes sont retenues: le printemps, l'été et l'automne ainsi que deux modes d'épandage (aéroaspersion et par rampe) et délais d'incorporation (enfoui en deçà d'un jour ou non enfoui). Les doses ont été estimées à partir des données fournies au tableau 5. Le tableau 16 présente ces quatre scénarios d'épandage et les doses appliquées au sol d'azote ammoniacal, de phosphore et de potassium, lors de l'épandage de lisier de porc en fonction des besoins comblés en azote pour la production du maïs-grain, selon les recommandations du CPVQ (1994). Aussi, 20 kg N/ha ont été déduits puisque l'on suppose qu'un engrais minéral de démarrage est appliqué lors du semis.

Puisque le type de sol est une caractéristique intrinsèque des unités cartographiques, une dose moyenne a été retenue pour les types d'utilisation: 61 t/ha au printemps, 59 t/ha à l'été et 47 t/ha à l'automne.

Ainsi, quatre scénarios d'épandage de lisier sur maïs sont définis pour l'évaluation de la capacité de réception. En faisant l'hypothèse que la production de maïs ne se fait que sur des sols modérément bien à bien drainés soit naturellement ou artificiellement, huit types d'utilisation des terres peuvent être définis comme suit : quatre scénarios d'épandage sur les sols drainés artificiellement et les mêmes quatre scénarios sur les sols non drainés.

---

<sup>33</sup> Régie de l'assurance récolte, communication personnelle 1994)

<sup>34</sup>  $7.2 * 27.9$

<sup>35</sup>  $7.2 * 10.6 * 0.437$  pour convertir  $P_2O_5$  en P

<sup>36</sup>  $7.2 * 21.6 * 0.83$  pour convertir  $K_2O$  en K

**Tableau 16. Apports en NPK selon le mode et la période d'épandage**

Mode	Type de sol	Période			
		Printemps non enfoui	Printemps enfoui	Été post-levé	Automne enfoui
Travail du sol		superficiel		aucun	labour
Mode d'épandage		aéroaspersion		rampe	aéroaspersion
Délai d'incorporation		aucune	<1 jour	aucune	<1 jour
<b>Apports</b>					
Besoins en N comblés par le lisier de porc		100% (150 kg N/ha)	100% (150 kg N/ha)	100% (150 kg N/ha)	50% (75 kg N/ha)
Dose appliquée (t/ha) <sup>a</sup>	Sable	64	64	59	53
	Autres sols	59	59	59	41
Azote ammoniacal (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> kg/ha)	Sable	85	61	78	58
	Autres sols	78	55	78	45
Phosphore (kg P/ha)	Sable	57 (130 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	57 (130 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	52 (118 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	29 (66 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
	Autres sols	52 (118 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	52 (118 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	idem	23 (52 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
Potassium (kg K/ha)	Sable	95 (114 K <sub>2</sub> O)	95 (114 K <sub>2</sub> O)	87 (104 K <sub>2</sub> O)	56 (67 K <sub>2</sub> O)
	Autres sols	108 (130 K <sub>2</sub> O)	108 (130 K <sub>2</sub> O)	108 (130 K <sub>2</sub> O)	69 (83 K <sub>2</sub> O)

<sup>a</sup>La dose varie en fonction du type de sol et du délai d'incorporation.

### 4.3 Validation du modèle d'évaluation

Le modèle d'évaluation et les résultats obtenus par l'interprétation des données pédologiques ont été confrontés à trois sources d'informations : 1) des données mesurées et observées provenant d'études empiriques québécoises et celles des études pédologiques détaillées, 2) les résultats d'une enquête auprès d'experts et 3) les résultats obtenus avec d'autres modèles d'évaluation indirecte.

L'enquête auprès des experts a permis de vérifier la base de connaissances du système. Cette enquête consistait à l'envoi d'un questionnaire à choix multiples suivi d'une entrevue dirigée. Les experts ont été choisis selon leur différente expertise (fertilité, physique et chimie des sols, culture du maïs, gestion des surplus, etc.). Douze experts ont répondu à l'invitation et ils viennent du milieu universitaire, de firmes privées, d'Agriculture Canada, du ministère de l'Environnement et de la Faune ainsi que des bureaux régionaux et du service des sols du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Sept séries de sols ont été soumises à leur évaluation. Leurs caractéristiques physiques et chimiques correspondaient aux unités cartographiques retenues pour l'évaluation dans le présent travail.

Les questions ont été regroupées en trois parties. La première partie portait sur l'évaluation du potentiel de recyclage des éléments nutritifs par le maïs-grain. Les questions portaient sur l'aptitude physique des sols pour la production de maïs-grain (conditions de mécanisation, date d'ensemencement, disponibilité en eau, estimation des rendements). La deuxième partie englobait les questions sur les risques de pertes à l'environnement (pertes par volatilisation, par ruissellement ou par lessivage). Une estimation des risques de surfertilisation à partir des scénarios décrits plus tôt et une évaluation globale de l'aptitude des sols à recevoir des engrais de ferme sans dommage à l'environnement terminaient ce questionnaire.



Les résultats ont été compilés selon la classification et les critères diagnostiques ayant servi à l'expert pour évaluer chaque qualité de sol ou aptitude du questionnaire. Il est à noter que seulement cinq des experts étaient familiers avec les séries de sol. Pour les autres, l'entrevue a permis de dégager leurs critères diagnostiques. Les résultats de l'enquête sont présentés à l'annexe 4.

De plus, d'autres méthodes d'évaluation suggérées dans la littérature seront utilisés à titre de comparaison au niveau des critères diagnostiques retenus et des résultats de la classification des unités cartographiques. Par exemple, la classification selon les rendements potentiels a été comparée avec la classification de ITC modifié et le SPI développé au New Hampshire. Les grilles d'interprétation de Hall (1976), de McRae et Burnham (1981) et de Heidlage et Shingleton (1984) ont été retenues pour l'estimation de la capacité réceptrice.

**Chapitre 5**  
**Méthode de classification des sols**  
**agricoles selon leurs**  
**aptitudes physiques à recevoir**  
**des engrais de ferme**



## 5. MÉTHODE DE CLASSIFICATION DES SOLS AGRICOLES SELON LEURS APTITUDES PHYSIQUES À RECEVOIR DES ENGRAIS DE FERME

Tel que vu précédemment, l'évaluation de la capacité de réception des sols nécessite, d'une part, l'évaluation de l'aptitude à produire une culture, ici le maïs-grain, et d'autre part, l'évaluation de l'aptitude des sols à minimiser les pertes à l'environnement. Les unités cartographiques de sols seront classées selon le facteur le plus limitant. La figure 4 représente le modèle global d'évaluation.

Premièrement, les sols sont évalués selon leur aptitude à la production de maïs-grain. Cette capacité dépend de trois qualités : l'aptitude physique du sol à produire du maïs, les conditions de mécanisation et la productivité potentielle du sol pour le maïs (rendements potentiels). Le recyclage par le maïs-grain sera déterminé par l'estimation des rendements potentiels. Deuxièmement, la vulnérabilité des sols aux pertes à l'environnement peut limiter la quantité d'engrais qu'il est possible d'épandre. Les sols sont classés selon les pertes potentielles qu'ils présentent. Finalement, compte tenu de la disponibilité de données chimiques pour la région à l'étude, les risques de déséquilibre nutritif du sol sont évalués en fonction des besoins en NPK de la culture, de la fertilité du sol et de l'apport en lisier de porc.

Les mêmes quatre scénarios d'épandage définis au tableau 16 sont utilisés pour les sols drainés artificiellement et les non drainés, pour un total de huit types d'utilisation des terres. Le modèle d'évaluation reste le même pour les huit, mais les variables externes au sol changent en fonction de la présence ou non de drains artificiels et des scénarios, soit le mode et la période d'épandage (précipitations, température, apports en NPK). Le degré de saturation en eau du sol sera le principal facteur affecté par les variables climatiques.

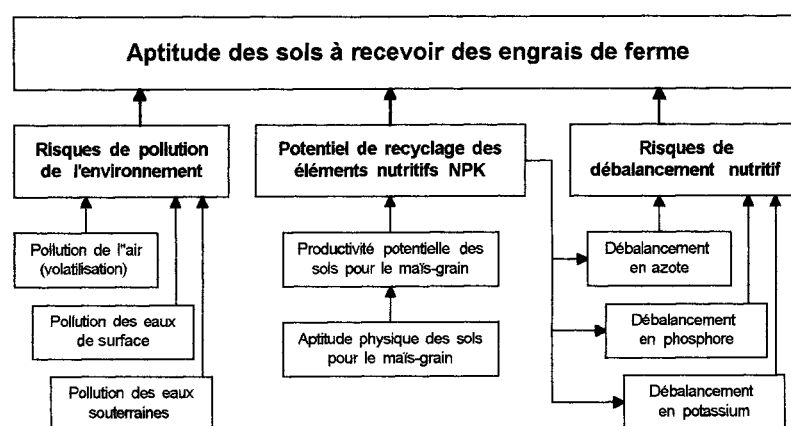


Figure 4. Modèle d'évaluation de l'aptitude physique des sols

## 5.1 Potentiel de recyclage par la culture

L'évaluation du potentiel de recyclage des éléments nutritifs par les cultures est déterminante dans l'évaluation de l'aptitude physique des sols à recevoir des charges annuelles d'engrais de ferme. Rappelons les hypothèses sous-jacentes. Une première suggère que l'absorption par les plantes de tous les éléments nutritifs épandus réduit les risques de pollution des eaux et qu'un rapport existe entre la quantité d'éléments absorbés et le rendement de la production. Une seconde hypothèse stipule qu'il est possible d'estimer les rendements potentiels pour une culture donnée en tenant compte des facteurs limitants du sol. On peut ainsi déduire qu'un faible rendement (sol peu apte à produire du maïs) se traduit par une faible absorption d'éléments nutritifs et un plus grand risque de pollution par ruissellement et par lessivage.

Le potentiel de recyclage de NPK est estimé en se basant sur l'aptitude des sols à produire du maïs-grain et sur l'estimation des rendements potentiels pour le maïs-grain. Cette évaluation nécessite trois prérequis. Le sol peut-il supporter physiquement la production de maïs? Peut-on travailler le sol? L'état hydromorphique du sol limite-t-il les rendements potentiels? L'état hydromorphique inclut les risques d'inondation, le drainage, la capacité du sol à retenir l'eau ou la disponibilité en eau pour les plantes. La logique du modèle et les caractéristiques utilisées sont illustrées à la figure 5.

### 5.1.1 Aptitude à produire le maïs-grain

Les unités cartographiques sont regroupées en cinq classes d'aptitude définies comme suit:

1. Les *sols très aptes* offrent des conditions exceptionnelles, soit aucune limitation à la production tant au niveau physique (épaisseur du sol, drainage, capacité de rétention de l'eau, structure) que chimique (CEC).
2. Les *sols aptes* n'ont pas de limitation permanente et permettent d'obtenir le rendement moyen de la région. Ils peuvent présenter un léger risque de stress hydrique ou une CEC modérée.
3. Les *sols moyennement aptes* possèdent un mauvais drainage, une faible capacité de rétention de l'eau ou une faible CEC. Les coûts pour corriger ces limitations du sol peuvent être élevés et les rendements attendus sont moyens.
4. Les *sols peu aptes* présentent des limitations telles que les coûts de production (correction des limitations) sont plus élevés que les revenus attendus de la récolte.
5. Finalement, les *sols inaptes* ne peuvent supporter physiquement la production de maïs (limitation physique permanente majeure). Notons qu'un sol jugé peu apte ou inapte pour le maïs peut s'avérer apte pour un autre type de culture.

Les meilleurs sols sont les sols profonds, leur fertilité est adéquate, et leur pH est compris entre 5.5 et 7.0 (optimum 6.5). Le modèle ne tient pas compte du pH, facilement corrigible, ni de la fertilité des sols puisqu'elle dépend de la gestion des sols et des antécédents culturels. Ainsi, sont classés inaptes, les unités présentant des risques d'inondation, une

épaisseur de sol extrêmement mince (<20 cm) ou étant très mal drainées. L'annexe 5 illustre l'arbre de décision pour un sol bien drainé.

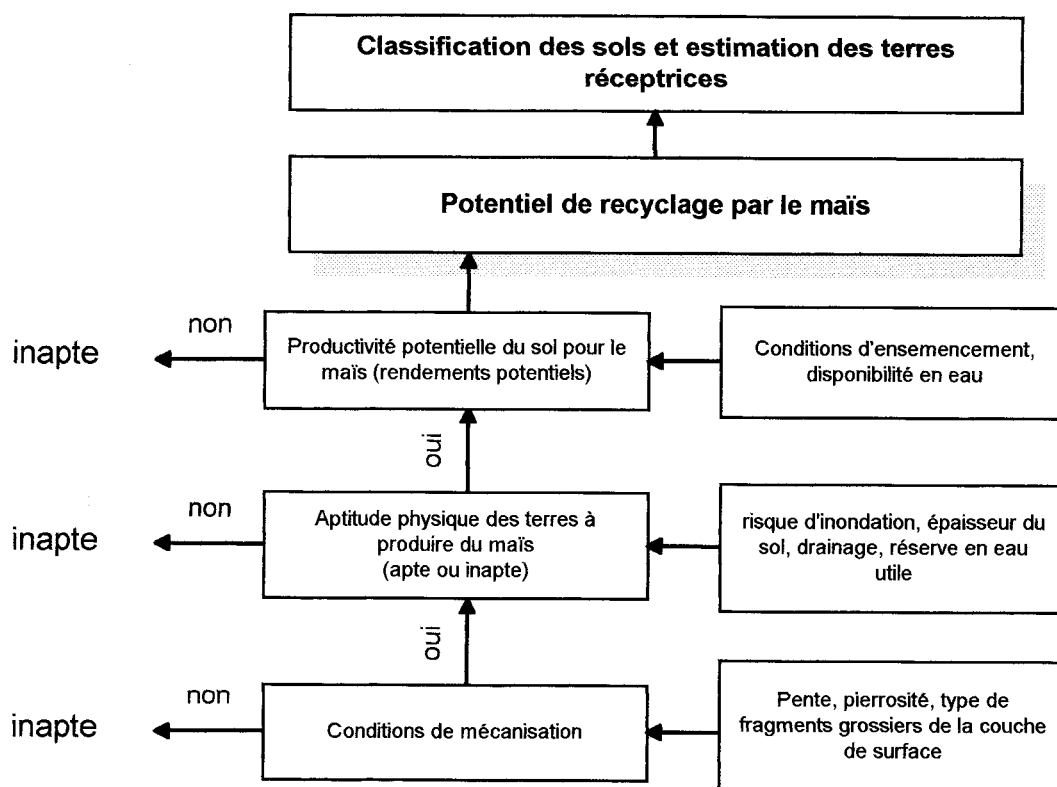


Figure 5. Potentiel de recyclage par le maïs

Les conditions de mécanisation précisent le degré d'aptitude des sols à être travaillés. Les unités cartographiques sont classées en trois classes de limitation. Les facteurs discriminants sont la pente, la pierrosité et le pourcentage de gravier et de cailloux. Pour la première classe, aucune limitation empêche le travail du sol ou le passage de l'épandeur; la pente varie de 0 à 8%, le sol non pierreux à légèrement pierreux, avec pas plus de 50% de cailloux. La deuxième classe rassemble les unités présentant quelques limitations : les sols sont caillouteux ou pierreux et la pente varie entre 8 et 15%. Le travail du sol de ces unités peut engendrer des frais supplémentaires en carburant et en entretien de la machinerie. Finalement, la troisième classe rassemble les unités à forte pente (risque de verse), très caillouteux ou très pierreux. Des conditions de mécanisation très limitantes classeront les unités comme inaptes. L'arbre de décision de l'annexe 6 représente les décisions relatives aux conditions de mécanisation pour un sol de pente 0 à 8% et peu pierreux.

### 5.1.2 Productivité potentielle et estimation des rendements

La productivité potentielle des sols pour la production de maïs dépend en partie de la longueur de la saison de croissance. Celle-ci est déterminée, premièrement, par la date de mise en terre des semences qui dépend de l'humidité du sol et, deuxièmement, par la

température du sol qui influence la germination. Le nombre de degré-jour et les UTM ne sont pas des facteurs significatifs lorsqu'une seule région climatique est évaluée.

Le drainage et la perméabilité du profil permettent d'estimer, d'une part, l'humidité du sol par la vitesse d'évacuation de l'eau du profil et, d'autre part, la vitesse de réchauffement du sol. En général, chaque semaine de retard sur l'ensemencement diminuerait le nombre d'unités thermiques maïs (UTM) d'environ 100 (CPVQ 1984).

Les unités cartographiques sont classées en quatre groupes: 1) saison hâtive, 2) moyenne, 3) tardive ou 4) très tardive. Ainsi, une unité classée "hâtive" a la plus longue saison végétative. Cette unité s'égoutte bien et se réchauffe rapidement par rapport aux autres unités. L'annexe 7 illustre la logique suivie pour cette classification.

La fertilité du sol n'a pas été retenue comme facteur discriminant pour deux raisons. Cette qualité du sol est fortement influencée par les antécédents cultureux et les racines "spécialisées" du maïs lui permettent de mieux absorber les éléments nutritifs apportés (A. Brunelle, communication personnelle 1994). Dans le modèle, le rendement est déduit de l'état d'hydromorphie du sol, attribut spécifique à chaque unité de sol. Les qualités de sol utilisées à cette fin sont la longueur de la saison de croissance et le risque de stress hydrique dans une moindre mesure. Deux évaluations distinctes ont été effectuées pour tenir compte de la présence possible de drains artificiels puisque 50% des terres sont drainés artificiellement (voir chapitre 4). La prise en compte du drainage artificiel s'est fait à l'aide d'un arbre de décision réduisant de deux classes le drainage naturel des unités, par exemple, un sol mal drainé deviendra modérément bien drainé sous drainage artificiel.

Le rendement optimal correspond au rendement attendu dans les meilleures conditions, c'est-à-dire un rendement réaliste et pouvant être atteint et non au maximum biologique. Dans la région à l'étude, le rendement moyen enregistré sur quinze ans par la Régie de l'assurance-récolte (communication personnelle 1994) est de 7.2 t/ha. Le rendement minimal est d'environ 5.5 t/ha et maximal 8.7 t/ha. Même si certaines municipalités enregistrent des rendements de plus de 9 t/ha, le rendement optimal utilisé dans le modèle sera de 8 t/ha. Le rendement optimal sera réduit proportionnellement selon la sévérité que représentent la longueur de la saison de croissance et la disponibilité en eau.

**Tableau 17. Productivité proportionnelle des sols pour le maïs**

Conditions d'ensemencement	Disponibilité en eau		
	adéquate	limitante	stress sévère
hâtive	1	0.85	0.6
moyenne	0.91	0.8	0.6
tardive	0.75	0.6	0.5
très tardive	0.55	0.44	0.33

Le coefficient de rendement proportionnel attribué à chaque niveau de sévérité affecte le rendement de façon multiplicative où le coefficient 1 correspond à l'optimum et 0 à aucun rendement. Le tableau 17 illustre les décisions et l'impact sur les rendements de ces deux facteurs. De plus, un coefficient de 0.9 est attribué aux unités présentant des risques élevés

d'érosion hydrique (voir tableau 19). Ces coefficients ont été obtenus par intération en tenant compte des résultats de l'enquête et des données relevées dans la littérature.

### 5.1.3 L'évaluation du potentiel de recyclage

Ainsi, le potentiel de recyclage du lisier de porc dépend du type de culture, de l'aptitude physique du sol et de sa productivité potentielle envers cette culture. D'une part, l'évaluation de l'aptitude physique permet d'éliminer les superficies inaptées à la production du maïs (donc n'ayant aucun potentiel de recyclage). D'autre part, l'évaluation de la productivité potentielle des sols jugés aptes à la production permet l'estimation du prélèvement des éléments nutritifs par le maïs.

La première étape de la classification des unités cartographiques selon le potentiel de recyclage est alors possible: la classe 1 (élevé), les sols sont très aptes à la production de maïs et leur productivité potentielle pour la région est de plus de 7 t/ha; la classe 2 (moyen), les sols sont moyennement aptes et leur productivité potentielle varie entre 5 et 7 t/ha; la classe 3 (faible), les sols sont peu aptes et leur productivité serait de 1,5-5 t/ha et finalement; la classe 4 (nul).

Aussi, à partir d'une évaluation qualitative des sols, on peut évaluer quantitativement la quantité de lisier de porc qu'une région donnée pourrait théoriquement recevoir. En effet, l'estimation des rendements de maïs permet de quantifier le prélèvement potentiel pour chaque élément NPK. Le programme considère le maïs récolté et les éléments prélevés comme des extrants de l'utilisation du sol. Les données fournies au système pour le calcul des prélèvements et des exportations potentielles de NPK figurent au tableau 18. En se basant sur un rendement optimal de 8 tonnes à l'hectare, le programme déduit les prélèvements en utilisant les coefficients de limitation de rendement (ou à la productivité) de façon multiplicative (tableau 17). L'arbre de décision estimant les rendements s'applique pour chaque élément NPK.

**Tableau 18. Données pour l'estimation des prélèvements en NPK**

Nom de l'extrait	Code	Unités	Prix ou prélèvement <sup>a</sup> unitaire	Prélèvement maximum
Maïs-grain	mais	tonne	120,00\$	8 t/ha
Azote total	N	kg	27,9	223 kg/ha (8*27,9)
Azote exporté	Nexp	kg	19,5 (27,9*70%)	156 kg/ha
Phosphore (P-Mehlich 3)	P	kg	4,6 (10,6 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *0,437)	36,8 kg/ha
Phosphore exporté	Pexp	kg	3,2 (10,6*0,437*70%)	25,7 kg/ha
Potassium	K	kg	17,9 (21,6 K <sub>2</sub> O*0,83)	143 kg/ha
Potassium exporté	Kexp	kg	5,4 (21,6*0,83*30%)	42,9 kg/ha

<sup>a</sup>CPVQ 1990

## 5.2 Risques de pertes à l'environnement

Avec les données disponibles, trois types de pertes sont évalués dans le modèle. La figure 6 présente les éléments pris en compte pour la classification des sols en fonction des risques de perte qu'ils présentent.



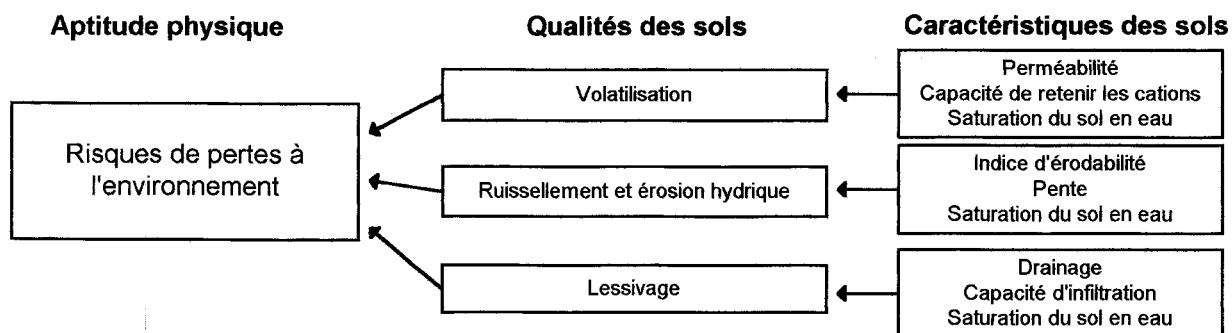


Figure 6. Évaluation des risques de pertes à l'environnement

### 5.2.1 Vulnérabilité à la volatilisation

La vulnérabilité d'un sol aux pertes par volatilisation est estimée à partir de la perméabilité de la couche de surface et de sa capacité à retenir  $\text{NH}_4^+$  (% argile). Un sol présentant une perméabilité de moins de 5 cm/hr présentera des risques élevés. Il en est de même pour les sols sableux. Les risques seront modérés pour les loams à perméabilité modérée. Les sols argileux perméables seraient les moins à risque.

Tableau 19. Risque de perte d'azote par volatilisation

Perméabilité du A	% d'argile du A											
	faible (<15%)				moyenne (15-40%)				élevée (>40%)			
	Pr <sup>a</sup>	Pr <sub>e</sub>	Été	Aut	Pr	Pr <sub>e</sub>	Été	Aut	Pr	Pr <sub>e</sub>	Été	Aut
lente	3	2	2	1	3	1	2	2	3	1	2	2
lente à mod.	3	2	2	1	3	1	2	2	3	1	2	2
modérée	3	2	2	1	3	1	2	1	3	1	2	2
mod. à rapide	3	1	2	1	3	1	2	1	3	1	1	2
rapide	3	1	2	1	3	1	1	1	3	1	1	2

Scénarios : Printemps non enfoui (Pr), printemps enfoui (Pr<sub>e</sub>), été, automne (Aut)

Classe : faible (1), modéré (2), élevé (3)

La dose, le mode et la période d'épandage influencent également l'importance des pertes. Le processus est plus important lorsque le lisier n'est pas enfoui (printemps et été), la perméabilité lente et la capacité de rétention faible. En été, la volatilisation sera plus ou moins importante selon la perméabilité de la couche de surface, le couvert végétal, le mode d'épandage, le taux de minéralisation de  $\text{NH}_4^+$  et la température. À l'automne, la température plus froide et l'enfouissement du lisier réduisent les pertes par volatilisation. La concentration de nitrates dans le sol étant plus élevée, les pertes par dénitrification augmentent avec le degré de saturation en eau du sol. Le tableau 19 présente la classification des sols selon les scénarios décrits au tableau 16.

### 5.2.2 Vulnérabilité au ruissellement

La vulnérabilité d'un sol au ruissellement et à l'érosion hydrique est déterminée par l'érodabilité de la couche de surface, la vitesse du ruissellement et la période d'épandage (variable constante dans le modèle). Le ruissellement est déduit à partir de la pente et de la

profondeur de la couche imperméable dans le profil. Un sol situé en dépression (pente 0-0.5%) et dont la perméabilité de la couche de surface est lente, aura un ruissellement très lent. L'estimation du ruissellement est présentée au tableau de l'annexe 8.

Pour sa part, l'indice d'érodabilité est estimé à partir de la teneur en sable très fin et en limon, du pourcentage en matière organique et du degré de développement de la structure. La teneur en carbonates peut influencer également l'indice d'érodabilité (facteur de cohésion entre les particules). La figure à l'annexe 8 indique une partie du raisonnement permettant de classer les unités cartographiques selon trois degrés d'érodabilité. Pour chaque scénario d'épandage, le tableau 20 montre la vulnérabilité des unités au ruissellement et à l'érosion hydrique en tenant compte des facteurs relevés précédemment.

La saturation en eau de la couche de surface favorise le ruissellement et elle varie selon la période d'épandage. Au printemps, les risques de ruissellement et d'érosion hydrique sont élevés en raison des volumes d'eau apportés par la fonte de la neige et les précipitations et de la saturation en eau du sol. L'érosion hydrique sera d'autant plus importante si le sol est saturé d'eau, ce qui diminue la cohésion entre les particules de sol (augmentation de l'érodabilité du sol). En été, les précipitations peuvent représenter de 30 à 40% des précipitations annuelles, mais le sol n'étant plus saturé en eau, l'érosion hydrique due au ruissellement sera plus faible que pour les autres scénarios. De plus, le couvert végétal diminue l'impact négatif des gouttes de pluie sur la couche de surface. À l'automne, cependant, les risques sont plus élevés en absence de couvert végétal.

**Tableau 20. Vulnérabilité à l'érosion hydrique**

Ruissellement	Érodabilité du A		
	faible	moyenne	élevée
nul	1	1	2
très lent	1	1	2
lent	1	2	2
modéré	2	2	3
rapide	3	3	3
très rapide	3	3	3

Classe : faible (1), modéré (2), élevé (3)

**Tableau 21. Risque de perte par ruissellement**

Ruissellement	Érodabilité du A											
	faible				moyenne				élevée			
	Pr	Pr e	Été	Aut	Pr	Pr e	Été	Aut	Pr	Pr e	Été	Aut
nul	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2
très lent	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2
lent	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2
modéré	2	1	2	2	3	2	3	3	3	3	3	3
rapide	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
très rapide	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Scénarios : Printemps non enfoui (Pr), printemps enfoui (Pr\_e), été, automne (Aut)

Classe : faible (1), modéré (2), élevé (3)

### 5.2.3 Vulnérabilité au lessivage

Les risques de lessivage sont estimés à partir 1) du type de régime hydrique (épaisseur du sol, perméabilité du profil, profondeur d'une couche imperméable, drainage et capacité de rétention de l'eau), et 2) de la capacité du profil à retenir les cations (% argile et % matière organique) dans une moindre mesure. Les sols les plus vulnérables sont très perméables, très bien drainés, avec une faible réserve en eau utile. Les sols mal drainés présentent un risque élevé de lessivage en raison de la fréquence de la saturation en eau des sols. L'annexe 9 donne un exemple de l'arbre de décision pour un sol modérément bien drainé.

Au printemps et à l'automne, le bilan hydrique est positif et le sol est souvent saturé d'eau. Le lessivage des nitrates sera plus important pour ces deux saisons car le couvert végétal est inexistant et la concentration en nitrates de la solution du sol est plus élevée. Le tableau 22 résume la classification selon les scénarios retenus.

**Tableau 22. Risque de lessivage selon la période d'épandage**

Lessivage	Printemps non enfoui	Printemps enfoui	Été par rampe	Automne enfoui
faible	2	2	1	2
modéré	3	3	1	3
élevé	3	3	2	3

Classe : faible (1), modéré (2), élevé (3)

### 5.3 Risques de déséquilibre nutritif

Tel que vu précédemment, l'épandage de lisier de porc en tant que fertilisant apporte non seulement de l'azote mais également, d'autres éléments nutritifs. Est-ce qu'il existe des risques de déséquilibre nutritif (ou surfertilisation pour un élément) lorsque l'on tente de combler les besoins en azote du maïs avec le lisier? La surfertilisation présente une perte économique pour le producteur de maïs s'il ne tient pas compte de l'apport du sol (fertilité du sol) pour chaque élément et des besoins spécifiques en NPK des cultures.

Le modèle ne tient compte que des éléments les plus limitants pour la croissance des plantes, soit l'azote, le phosphore et le potassium. Un enrichissement en phosphore est considéré comme le facteur le plus limitant pour l'épandage de lisier de porc, si l'on tient compte des dispositions réglementaires québécoises actuelles. Pour sa part, l'évaluation de la réserve du sol en azote disponible aux plantes est complexe en raison des nombreux facteurs influençant son cycle et de la précision des données disponibles (incluant les facteurs anthropiques). Un plan de fertilisation intégré permettrait ce type d'évaluation (analyses de sol à l'appui). D'autre part, peu de données existent sur les impacts négatifs d'une surfertilisation en potassium sur la qualité de l'eau. Aussi, les estimations obtenues par le modèle pour ces deux éléments le sont à titre d'indicateur seulement et ne font pas partie de la classification globale des unités cartographiques.

Les doses apportées de NPK sont fixes pour chaque scénario d'épandage indépendamment de la fertilité du sol (tableau 16). D'ailleurs, les teneurs en éléments nutritifs disponibles à l'échelle du 1:20 000 sont très variables puisqu'elles découlent principalement de la gestion des sols (Nolin et al. 1989). Toutefois, certaines caractéristiques inhérentes au sol

influencent cette fertilité dont la capacité d'échange cationique (pour N et K) et la capacité de fixation du phosphore. La productivité potentielle des sols pour le maïs influence également ces risques. Quelle que soit la dose de lisier appliquée, les risques seront élevés pour les unités cartographiques ayant une productivité nulle, très faible ou faible. Il s'agit donc ici de classer les sols en fonction de ces caractéristiques et de leur productivité potentielle pour le maïs pour chaque élément (NPK) et d'évaluer ainsi les risques de déséquilibre nutritif pour chaque type d'utilisation.

### 5.3.1 Risque de déséquilibre nutritif en azote

La contribution du sol en azote disponible aux plantes dépend du taux de minéralisation de l'azote organique du sol. La quantité d'azote organique fluctue en fonction de plusieurs facteurs tels que la teneur en matière organique et en argile de la couche de surface. Aussi, les podzols minéralisent peu contrairement aux brunisols et aux gleysols. Dans le modèle la contribution du sol en azote est déduite de ces caractéristiques.

**Tableau 23. Contribution potentielle du sol en azote**

Ordre	Texture du A	Teneur en matière organique du A			
		faible (<1.7%)	modéré (1.7-4%)	élevé (4-9%)	très élevé (9-17%)
Podzol		faible	faible	faible	faible
Brunisol et Luvisol		faible	modérée	élevée	élevée
Gleysol	S, SL, LS	faible	faible	élevée	élevée
	L, LLi, Li	faible	modérée	élevée	élevée
	LSA, LA, LLiA, AS	faible	élevée	élevée	élevée
	ALi, A	modérée	élevée	élevée	élevée
	ALo	modérée	modérée	élevée	élevée
Organique		élevée	élevée	élevée	élevée

Le tableau 23 présente l'estimation de cette contribution potentielle. Au printemps, la minéralisation de l'azote organique est lente en raison de la température froide du sol et l'absorption par le maïs est nulle. En été, les besoins en azote du maïs sont très élevés et la minéralisation est à son maximum (Giroux 1988). Aussi, l'efficacité fertilisante du produit semble être maximale si la rampe d'épandage dépose le lisier sur le sol. À l'automne, sans couvert végétal, l'azote épandu risque d'être lessivé.

**Tableau 24. Risque de déséquilibre en azote**

Productivité potentielle	Contribution potentielle du sol en azote											
	faible				moyenne				élevée			
	Pr	Pr_e	Été	Aut	Pr	Pr_e	Été	Aut	Pr	Pr_e	Été	Aut
très élevée	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
élevée	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2
moyenne	1	1	1	2	1	1	1	3	2	2	2	3
faible	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
très faible ou nulle	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Scénarios : Printemps non enfoui (Pr), printemps enfoui (Pr\_e), été, automne (Aut)

Classes de risque: faible (1), modéré (2), élevé (3)

Très élevée (>8 t/ha), élevée (7-8 t/ha), moyenne (5,6-6,9 t/ha), faible (4,8-5,5 t/ha), très faible (<4,8 t/ha)

### 5.3.2 Déséquilibre nutritif en phosphore

Afin d'évaluer la disponibilité aux plantes des réserves du phosphore du sol, on ne peut ignorer la capacité de fixation du phosphore. Logiquement, le rendement des cultures serait plus élevé avec une capacité de fixation du phosphore plus faible. Dans le modèle, l'évaluation des risques de déséquilibre nutritif en phosphore tient compte de trois facteurs: 1) la capacité du sol à retenir le phosphore, 2) la productivité potentielle pour le maïs et, 3) la dose appliquée par rapport aux doses recommandées pour le maïs-grain par le CPVQ (1994). L'annexe 11 montre une estimation du dépassement des besoins en fonction de la dose appliquée. Le tableau 25 montre la classification des sols selon les risques de déséquilibre perçus.

**Tableau 25. Risque de déséquilibre en phosphore**

Productivité potentielle	Capacité de rétention du phosphore											
	faible				moyenne				élevée			
	Pr	Pr_e	Été	Aut	Pr	Pr_e	Été	Aut	Pr	Pr_e	Été	Aut
très élevée	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
élevée	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1
moyenne	2	2	2	3	2	2	2	3	1	1	2	2
faible	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
très faible ou nulle	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Scénarios : Printemps non enfoui (Pr), printemps enfoui (Pr\_e), été, automne (Aut)

Classes de risque: faible (1), modéré (2), élevé (3)

Très élevée (>8 t/ha), élevée (7-8 t/ha), moyenne (5,6-6,9 t/ha), faible (4,8-5,5 t/ha), très faible (<4,8 t/ha)

La capacité de rétention du phosphore est déduite à partir du type d'horizon, du type de matériau et de la classe calcaire. Les podzols ont une capacité élevée de rétention ainsi que les sols fortement calcaires. L'annexe 10 présente l'arbre de décision de cette qualité de sol. L'influence de la température sur la disponibilité du phosphore ainsi que le potentiel d'adsorption par le maïs sont constants pour chaque type d'utilisation. Aussi, plus la capacité de rétention du phosphore est faible, plus le phosphore pourra être disponible aux plantes ou lessivé.

### 5.3.3 Débalancement nutritif en potassium

Le débalancement nutritif en potassium (K) semble présenter moins d'impacts environnementaux négatifs que l'azote et le phosphore. Les plantes ont tendance à surconsommer le potassium s'il est présent en quantité suffisante (Brady, 1974). La productivité potentielle des sols pour le maïs, la dose épandue et la fertilité du sol en K sont les trois critères retenus pour l'évaluation du risque de débalancement. La fertilité du sol en K est déduite à partir du raisonnement utilisé pour estimer la capacité d'échange cationique (CEC) que complète le type de matériau sous la couche de surface. Les tableaux 26 et 27 montrent les décisions pour un sol d'une teneur moyenne de matière organique et pour l'évaluation du risque de débalancement nutritif.

**Tableau 26. Déduction de la fertilité du sol en potassium (1,7-4 %C org.)**

Texture du A	Type de matériau (75-125 cm)					
	argileux (>40%)	loameux (sédimentaire)	sableux (>70%)	till	graveleux (>20%)	organique (>17% C org.)
SG, S, SF, STF, SLG, SL, SLF	faible	faible	faible	faible	faible	faible
SLTF, LSG, LS, LSF	faible	faible	faible	faible	faible	faible
LSTF, LLLi	élevée	modéré	faible	faible	très faible	n/a
LSA, LA, LLiA	très élevée	élevée	modérée	modérée	faible	n/a
AS, A, ALi	très élevée	très élevée	très élevée	très élevée	très élevée	très élevée
ALo	très élevée	très élevée	très élevée	très élevée	très élevée	très élevée
organique	très faible	très faible	très faible	très faible	très faible	très faible

**Tableau 27. Risque de débalancement en potassium**

Productivité potentielle	Capacité d'échange cationique du A											
	très faible à faible				modérée				élevée			
	Pr	Pr e	Été	Aut	Pr	Pr e	Été	Aut	Pr	Pr e	Été	Aut
très élevée	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
élevée	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
moyenne	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
faible	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
très faible ou nulle	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Scénarios : Printemps non enfoui (Pr), printemps enfoui (Pr\_e), été, automne (Aut)

Classes de risque: faible (1), modéré (2), élevé (3)

Très élevée (>8 t/ha), élevée (7-8 t/ha), moyenne (5,6-6,9 t/ha), faible (4,8-5,5 t/ha), très faible (<4,8 t/ha)

## 5.4 Classification des sols selon leur capacité de réception

La première étape du modèle d'évaluation était de classer les unités cartographiques selon le potentiel de recyclage (élevé, moyen, faible, nul). L'évaluation des risques de pertes à l'environnement identifie le facteur potentiellement limitant si aucune mesure d'atténuation

n'est prise. Le problème de la pollution de l'eau étant criant, les risques de ruissellement et de lessivage sont retenus comme critères diagnostiques. Le programme classe les unités cartographiques selon le facteur le plus limitant. Ainsi, si les risques de ruissellement sont élevés pour une unité donnée, sa capacité de réception sera faible. Si le potentiel de recyclage est nul, la capacité de réception sera également nulle.

Cette évaluation semi-quantitative permet d'identifier les unités cartographiques les plus favorables à la disposition sécuritaire des lisiers, d'estimer les superficies réceptrices et le volume de lisier recyclable par épandage pour une région et un scénario d'épandage donné. L'évaluation de plusieurs scénarios ou types d'utilisation met en évidence l'impact des pratiques sur la capacité de réception.

Tel que vu précédemment, afin d'évaluer les relations "épandage-pollution", il est possible de réduire considérablement les coûts de l'acquisition et du traitement des données en utilisant les données déjà existantes comme celles fournies par les rapports pédologiques. Ce chapitre a exposé une méthode permettant de tenir compte du facteur "sol" dans l'estimation des superficies disponibles pour l'épandage d'engrais de ferme et qui exploite des données existantes et accessibles. Le cadre d'évaluation des terres proposé par la FAO a été adapté et le logiciel ALES a permis de monter un système expert pour l'interprétation des données pédologiques. Le prochain chapitre compare les résultats de l'évaluation des quatorze unités cartographiques avec les données mesurées et observées tirées de la littérature, avec les résultats de l'enquête et avec ceux obtenus à l'aide d'autres grilles d'interprétation.

# **Chapitre 6**

## **Résultats et discussion**





## 6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

---

Les résultats de l'évaluation et de la classification seront discutés dans l'ordre suivant et selon les méthodes proposées au chapitre 4 : 1) la déduction de caractéristiques de sol secondaires, 2) le potentiel de recyclage des éléments nutritifs par la culture du maïs et la déduction des qualités de sol et des aptitudes qui s'y rapporte, 3) les risques de pertes à l'environnement, 4) les risques de déséquilibre nutritif et l'évaluation et la classification des unités cartographiques selon leur aptitudes à recevoir du lisier de porc. Pour simplifier l'écriture, les unités cartographiques seront nommées dans le texte selon la série qui la caractérise et dans les tableaux, selon le code de l'unité.

### 6.1 Déduction de caractéristiques secondaires

Pour diminuer la taille des arbres de décision et, de ce fait, augmenter la vitesse de compilation de l'ordinateur, trois caractéristiques secondaires<sup>37</sup> ont été déduites, soit le drainage, la réserve en eau utile sur 100 cm de sol et la CEC des horizons A, B et C. Ces résultats figurent à l'annexe 12 ainsi que les données déduites simulant des sols drainés artificiellement et la capacité de rétention des cations du profil (qualité de sol). Toutefois, aucune donnée sur le comportement des sols après l'installation de drains artificiels permettait de valider la décision d'améliorer de deux classes le drainage.

Les valeurs attribuées au drainage (dr) correspondent bien à celles fournies par les études pédologiques, sauf pour l'unité St-Thomas qui diffère d'une classe (modérément bien au lieu de bien drainé) ce qui n'affecte pas les résultats subséquents. La similarité des résultats peut s'expliquer par le fait que les mêmes critères d'évaluation ont été utilisés dans les deux cas (observations sur le terrain vs modèle).

La réserve en eau utile déduite (re100) sur 100 cm de sol, corrobore bien avec la réserve en eau utile estimée (REU) fournie au chapitre 5 des rapports pédologiques de la plaine de Montréal<sup>38</sup>. Par contre, le modèle surestime la valeur pour l'unité Pierreville de deux classes : estimée comme basse à modérée, sa valeur déduite est élevée. Quatre unités varient d'une classe entre élevée et très élevée et une entre très basse et basse. Cette différence n'affecte pas les résultats.

Pour les unités considérées, l'évaluation de la capacité d'échange cationique (CEC) des sols minéraux est comparable aux données mesurées en laboratoire, fournies dans les études pédologiques. Par contre, le modèle surestime la CEC pour l'unité Cousineau (organique). Suite à l'enquête, quelques experts ont proposé l'hypothèse que l'argile contribuerait d'avantage que la matière organique à la rétention de cations  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{K}^+$ . Ces résultats permettent de conclure que les arbres de décision développés pourraient servir lorsque les données mesurées ou observées sont manquantes.

---

<sup>37</sup> *Caractéristiques déduites de caractéristiques de sol plus élémentaires, habituellement disponibles dans la majorité des études pédologiques*

<sup>38</sup> *Les rapports des comtés de Chambly, Richelieu et St-Hyacinthe*

## 6.2 Potentiel de recyclage par le maïs

Pour une estimation de superficies réceptrices pour un volume d'engrais de ferme donné, l'évaluation par type de culture demeure nécessaire (doses versus besoins des cultures). Le tableau 28 présente la classification de l'aptitude des sols à produire du maïs et les facteurs discriminants pour chaque unité ainsi que le classement selon leurs possibilités d'utilisation agricole d'après le système ITC modifié (Marshall et al. 1979). Sauf la différence entre les classes 2 et 3 du système ITC, la classification des deux systèmes corrobore assez bien dans l'ensemble et relève les facteurs discriminants similaires (drainage, fertilité, inondation). L'objectif poursuivi (aptitude versus possibilité), la différente pondération des facteurs et la prise en compte de la structure dans le système ITC explique les différences de classement.

L'enquête auprès des experts confirme les résultats obtenus par le système, bien que ceux-ci n'aient pas utilisé les mêmes critères (voir annexe 4). Pour certains, l'aptitude du sol à être travaillé était déterminante (% d'argile et drainage). Pour d'autres, la fertilité des sols et leur structure étaient les facteurs importants. Un modèle général, applicable pour la plupart des cultures devrait tenir compte de ces facteurs lorsque les données sont disponibles.

**Tableau 28. Aptitude du sol à produire du maïs-grain**

Unités	Sols non drainés	Sols drainés	Facteurs limitants	Classe ITC modifié <sup>a</sup>
AC1	moyennement apte	moyennement apte	drainage, disponibilité en eau, faible CEC	4F <sup>W</sup> d
AI3	moyennement apte	très apte	drainage	2Wd
BC4n	peu apte	peu apte	sol très mince	3WD
CO	inapte	inapte	sol organique, très mal drainé	04W <sup>i</sup> E
DA2	moyennement apte	très apte	drainage	2Wf(m) <sup>b</sup>
DU3jncqr	peu apte	peu apte	sol très mince	7MP <sup>R</sup> FT
HY3	moyennement apte	apte	drainage, faible CEC du A	2Wd
Jl3m	apte	apte	disponibilité en eau	3wdtfr
JS2	moyennement apte	apte	drainage et disponibilité en eau	2Wf(m)
PI3	inapte	inapte	risque d'inondation	3WId
PV5	peu apte	très apte	drainage, réserve en eau et CEC élevée	3WD
RS2	moyennement apte	très apte	drainage	2Wd
TH1b	moyennement apte	moyennement apte	disponibilité en eau, faible CEC	5M <sup>F</sup> T
UB4	peu apte	très apte	drainage, réserve en eau et CEC élevée	2W

<sup>a</sup>La définition des codes des unités cartographiques sont à l'annexe 2.

<sup>b</sup>Certains sols, particulièrement les sols sableux, risquent de souffrir d'un manque d'humidité s'ils sont drainés.

Outre l'aptitude du sol à produire du maïs, les qualités des terres qui affectent la productivité sont les suivantes : les conditions de mécanisation, la longueur de la saison de croissance et la disponibilité en eau. Les résultats obtenus pour ces qualités de sol figurent à l'annexe 13. Dans la région de Montréal, les unités cartographiques offrent peu de limitation, sauf l'unité Du Mont, très pierreuse, et 40% de la superficie de l'unité St-Thomas, en raison de sa pente de plus de 8%. L'unité Cousineau est classée inapte, car les sols organiques sont jugés inadéquats pour la production de maïs. Selon les experts, les facteurs

limitants pour le travail des sols de la plaine de Montréal sont la faible capacité portante des sols argileux gorgés d'eau, et une pente de plus de 15%, bien qu'une pente de 5% pourrait s'avérer limitante pour la machinerie lourde utilisée dans cette région. Par contre, dans les autres régions du Québec, les limites de classe et les facteurs retenus dans le modèle correspondent à ceux exprimés par les experts. Les unités de sols de ces régions sont plus accidentées et présentent des contraintes de pierrosité et d'affleurement rocheux.

Les conditions de plantation (pl) tiennent compte de la capacité portante puisque la date d'ensemencement est retardée sur les sols mal drainés et peu perméables<sup>39</sup>. Le système classe la plupart des unités comme ayant une saison de croissance moyenne en raison du mauvais drainage. Pour les types d'utilisation sur sols drainés artificiellement, le drainage artificiel allonge la saison de croissance (pl\_d), sauf pour les unités ayant une faible perméabilité (Providence) ou ayant une couche imperméable peu profonde (Boucherville et Du Mont).

Quelques experts ont jugé l'évaluation de cette qualité non pertinente pour deux raisons: d'une part, la disponibilité d'hybrides hâtifs de maïs permet d'obtenir des rendements similaires aux hybrides tardifs et, d'autre part, la majorité des terres agricoles sont déjà drainées. Dans ce cas particulier (région de Montréal et sols drainés artificiellement), l'évaluation des sols non drainés pourrait être ignorée. Par contre, pour un autre type de culture comme les céréales, ce critère serait important pour l'estimation des rendements.

Les sols étudiés ont généralement une bonne disponibilité en eau. Seuls les sols très minces ou sableux présentent des risques de stress hydrique, surtout si ces derniers sont drainés (de\_d). L'évaluation de la disponibilité en eau (de) ou du risque de stress hydrique corrobore avec le jugement des experts. Ceux-ci ont utilisé les mêmes critères que ceux du système. Par contre, l'utilisation de moyennes climatiques était questionnée par certains pour qui une pondération des saisons normales, sèches et humides serait souhaitable pour tenir compte de la variation temporelle du climat. Cependant, dans la mesure où il s'agit de conserver le système le plus simple et général possible, l'approche retenue leur semblait acceptable. Toutefois, il serait simple de simuler les saisons sèches et humides pour vérifier l'écart des résultats avec les données de la Régie de l'assurance récolte. Pour rendre le système exportable à d'autres régions du Québec, il suffit d'inclure les données climatiques dans l'arbre de décision (UTM, degrés-jours et précipitations moyennes mensuelles).

### 6.2.1 Rendements potentiels en maïs et prélèvements en NPK

Les résultats du modèle ont été comparés également avec ceux de l'enquête et les résultats dérivés de la clé d'interprétation du comté de Cheshire (tableau 7). Les résultats figurent au tableau 29. Les prélèvements en NPK par le maïs sont estimés pour la plante entière, alors que seul l'épi est récolté. La tige est laissée au champ, mais la contribution en azote de ce résidu végétal est faible compte tenu de son rapport C/N élevé. Ainsi, en faisant l'hypothèse que le maïs est produit sur des sols drainés artificiellement et sur la superficie totale des unités retenues, soit 18 000 ha, les prélèvements totaux en NPK seraient de 3 385 Mg N, 554 Mg P et 2 168 Mg K. Les possibilités d'exportations hors du bassin par le maïs-grain

---

<sup>39</sup> Dans une évaluation économique, le coût de la pose de drains diminuerait les gains économiques de la production pour les années de l'amortissement de l'investissement.

(épi seulement) seraient de 2 367 Mg N, 393 Mg P et 651 Mg K. Les résultats calculés par le modèle figurent à l'annexe 14. Seules les sols offrant un potentiel de recyclage ont été retenus par le modèle (moyennement apte à très apte comme le suggère le cadre d'évaluation de la FAO).

**Tableau 29. Productivité potentielle en maïs-grain**

Unités	SPI (t/ha)	Maïs (t/ha)	Maïs d (t/ha)	Experts
AC1	6	6	6.8	
AI3	8	6	8	
BC4n	0	4.4	3.52	
CO	0	0	0	aucun
DA2	6	6	7.2	modéré à élevé
DU3jncqr	3.2	5.7	5.7	
HY3	8	6	8	élevé
JI3m	6	6	6.8	
JS2	6	6	6.8	modéré
PI3	8	0	0	
PV5	8	6	7.2	modéré à élevé
RS2	8	6	8	
TH1b	6	6.8	6.8	faible à modéré
UB4	8	6	8	élevé

Six experts connaissaient bien les sept séries retenues pour l'enquête et tous ont considéré les sols comme drainés artificiellement. Leurs critères étaient pour la plupart la fertilité des sols, leur texture, leur structure et leur perméabilité. Selon plusieurs experts consultés, l'approche centrale est discutable, car le rendement moyen n'est pas vraiment représentatif des rendements potentiels puisque ceux-ci peuvent varier de plus ou moins trois tonnes d'une année à l'autre, selon les conditions climatiques pour un même sol et une même région. De plus, le prélèvement diffère d'une culture à l'autre, tant au niveau des quantités prélevées que de la dynamique des prélèvements qui diffèrent selon le stade de croissance. Si le modèle d'évaluation devait être appliqué à d'autres régions et pour d'autres cultures, ces facteurs externes au sol devraient être inclus dans les arbres de décision et dans les scénarios d'épandage. Aussi, une analyse statistique des rendements obtenus sur ces séries sur plusieurs années et sous diverses régions permettrait de valider cette méthode d'évaluation.

### 6.3 Risques de pertes à l'environnement

Alors que le potentiel de recyclage des éléments nutritifs par les cultures détermine le potentiel d'utilisation des terres agricoles, c'est l'évaluation des risques de pertes à l'environnement permet d'identifier les séries présentant des risques. Ainsi, certaines pratiques agricoles pourraient être suggérées pour diminuer ces risques. Les risques environnementaux traités sont la volatilisation, le ruissellement et l'érosion hydrique et le lessivage. Les résultats d'évaluation sont présentés par thème, avec et sans prise en compte du mode et de la période d'épandage.

### 6.3.1 Vulnérabilité à la volatilisation

En tenant compte que des caractéristiques intrinsèques du sol (perméabilité et % argile du A), toutes les séries présentent des risques élevés si les sols ne sont pas drainés (ETA). L'épandage au printemps non enfoui (pr) est également problématique (faible perméabilité, saturation en eau et pas de couvert végétal). Les résultats sont présentés par scénario à l'annexe 15. Les séries les moins à risque ont une bonne perméabilité et plus de 40% d'argile dans la couche de surface.

Le raisonnement des experts variait en fonction de leur champ d'expertise. Mais tous s'accordent pour dire que les facteurs externes au sol prédominent sur les caractéristiques du sol. Par exemple, le travail du sol augmente la perméabilité de la couche de surface. La perméabilité de la couche de surface fournie dans les rapports pédologiques peut donc varier selon la gestion des terres. De même, la saturation en eau du sol, facteur<sup>40</sup> également déterminant dans le processus de volatilisation, varie selon la fréquence et la quantité d'eau apportée par les précipitations.

Les caractéristiques intrinsèques du sol ne s'avèrent donc pas discriminantes dans l'évaluation des risques de volatilisation. Par contre, les pratiques agricoles (mode et période d'épandage, composition du produit) sont prépondérantes ainsi que les facteurs climatiques (vitesse du vent et température). Par conséquent, l'évaluation des risques de volatilisation ne devrait pas être retenue comme critère diagnostique dans une classification à l'échelle régionale.

### 6.3.2 Vulnérabilité au ruissellement

Compte tenu de la topographie généralement plate et des sols relativement profonds de la région, la plupart des séries évaluées présentent peu de risques de ruissellement. Trois unités présentent des risques modérés d'érosion hydrique, en raison d'une faible perméabilité ou d'un indice d'érodabilité élevé. Le tableau 30 présente les indices d'érodabilité déduits et comparés avec les résultats dérivés de l'équation du facteur d'érodabilité K (Latreille et al. 1993). Pour ce faire, la valeur centrale de la classe a été retenue pour le pourcentage en argile, en limon, en sable et en matière organique. Les codes de structure et de perméabilité ont été établis avec les données pédologiques et non selon les codes proposés par Cook et al. (1985). L'érodabilité est considérée comme faible (f) si  $K < 0.04$ , modérée (m) si  $K = 0.04 - 0.08$  et élevée (e) pour  $K > 0.08$ . Les résultats d'érodabilité sont similaires pour 10 séries sur 12. Les différences proviennent d'une différente pondération de la structure et la perméabilité entre les deux modèles.

L'évaluation de la vulnérabilité des sols au ruissellement et à l'érosion hydrique combine la capacité intrinsèque des sols à minimiser les risques de pertes et l'influence du mode et de la période d'épandage. L'annexe 16 présente les résultats par scénario. L'unité Du Mont présente le plus de risques quel que soit le scénario d'épandage. L'enfouissement du lisier reste une mesure préventive intéressante pour les sols à faible perméabilité comme l'unité Providence. L'épandage par rampe en post levée limite également les risques par ruissellement. Ces deux pratiques permettraient d'élever d'une classe (classe 2 à 1) les

---

<sup>40</sup> Il influence les pertes par dénitrification et par évaporation.

unités St-Hyacinthe, Pierreville et Providence. Cette classification permet d'estimer les superficies à risque élevé (classe 3) à 40 ha sur 18 217 ha évalués.

**Tableau 30. Classification de l'érodabilité et des risques de ruissellement**

Unités	Indice d'érodabilité	Facteurs limitants	Facteur K	Facteurs limitants	Risque de ruissellement	Facteurs limitants
AC1	faible		0.021 (f)		1	
AI3	faible		0.024 (f)		1	
BC4n	faible		0.044 (m)	structure et perméabilité	1	
CO	faible		d.m.		1	
DA2	faible		0.013 (f)		1	
DU3jncqr	élevée	LLi	d.m.		3	sol mince et de forte pente
HY3	élevée	LLi	0.033 (f)		2	érodabilité
JI3m	faible		0.025 (f)		1	
JS2	faible		0.019 (f)		1	
PI3	modéré	LS, % sable très fin	0.049 (m)	% sable très fin et limon	2	érodabilité
PV5	modéré	ALi peu structuré	0.023 (f)		2	érodabilité
RS2	faible		0.035 (f)		1	
TH1b	faible		0.011 (f)		1=,6,2=.4	pente
UB4	faible		0.008 (f)		1	

Classes : faible (f), modéré (m), élevé (e)

La difficulté d'évaluer la capacité "intrinsèque" des sols devient évidente lors de l'enquête auprès des experts. Pour la plupart des experts questionnés, les facteurs climatiques et anthropiques<sup>41</sup> influencent grandement la vulnérabilité à l'érosion hydrique. Concernant les caractéristiques de sol retenus, la pente devenait un facteur contraignant entre 3 à 10%. Le degré de développement de la structure utilisée dans le modèle présente des classes trop imprécises pour certains et varie au cours de la saison et selon les facteurs anthropiques. Toutefois, règle générale, la perméabilité, la pente et la texture ont été retenus comme facteurs discriminants ainsi que le degré de saturation en eau de la couche de surface (facteur variant selon la saison d'épandage, donc fixe pour un type d'utilisation donné).

### 6.3.3 Vulnérabilité au lessivage

Les facteurs limitants sont le mauvais drainage, la faible capacité de rétention de l'eau et la vitesse d'infiltration de l'eau pour plusieurs séries. Les séries présentant une couche imperméable ou de faible perméabilité sont les moins vulnérables. La capacité de rétention des cations (complexe adsorbant) s'avère un facteur peu discriminant, mais le drainage et la capacité de rétention de l'eau le sont. Le tableau 31 résume les résultats obtenus sans scénario et avec les scénarios retenus.

<sup>41</sup> Notamment la rotation des cultures, les résidus végétaux laissés au champ, le travail du sol.

Tableau 31. Classification de la vulnérabilité au lessivage

Unité	lessivage sols non drainés	lessivage sols drainés	Facteurs limitants	Pr	Pre	Été	Aut
AC1	3	3	capacité de rétention de l'eau	3	3	2	3
AI3	3	2	perméabilité et faible CEC	3	3	2	3
BC4n	1	1		2	2	1	2
CO	1	1		2	2	1	2
DA2	3	3	perméabilité et rétention de l'eau	3	3	2	3
DU3jncqr	1	1		2	2	1	2
HY3	3	2	perméabilité et faible CEC	3	3	2	3
JI3m	1	1		2	2	1	2
JS2	3	3	capacité de rétention de l'eau	3	3	2	3
PI3	3	2	drainage, capacité de rétention de l'eau et des cations	3	3	2	3
PV5	1	1		2	2	1	2
RS2	3	2	perméabilité et faible CEC	3	3	2	3
TH1b	3	3	capacité de rétention de l'eau	3	3	2	3
UB4	2	1	perméabilité	3	3	1	3

Classes : faible (1), modéré (2), élevé (3)

Printemps non enfoui (Pr), printemps enfoui (Pre), Automne (Aut)

Huit unités cartographiques sur quatorze présentent des risques élevés de pertes par lessivage. Les risques diminuent si les sols drainés artificiellement (pour cinq séries), mais ils augmentent les risques de pollution des eaux de surface, l'eau des drains s'y rendant plus rapidement (Côté 1994). Au printemps et à l'automne, les séries présentant une couche imperméable sont moins vulnérables. L'épandage d'été (Été) diminue les risques de lessivage en raison du faible risque de saturation en eau du sol. Selon cette évaluation, les risques de lessivage sont un facteur limitant pour l'épandage dans un contexte de contrôle de la pollution de l'eau souterraine pour la région étudiée (gleysols mal drainés). Ainsi, selon l'utilisation des sols drainés et sans scénarios d'épandage 2800 ha présentent peu de risques de lessivage, 7 660 ha des risques modérés et 7 800 ha des risques élevés (annexe 17).

Sur cette question, la logique et les critères utilisés variaient d'un expert à l'autre (capacité d'adsorption du profil, potentiel de recyclage des cultures, bilan hydrique). Il appert que la texture et la CEC sont des caractéristiques importantes pour l'évaluation des risques de lessivage. Selon certains, la texture permettait de déduire la perméabilité et la capacité de rétention de l'eau et la CEC, le risque de saturation en éléments nutritifs des sites d'adsorption. Toutefois, les résultats démontrent l'avantage de travailler à partir du concept de série et que la texture ne suffit pas. En effet, les sols de la série St-Urbain (unité UB4), bien qu'argileux, sont très perméables et présentent certains risques de lessivage (modérés) alors que les sols de la série Providence présentent de faibles risques (tableau 31).

Certains ont soulevé que le lessivage ne devrait être utilisé comme critère diagnostique puisque la concentration en nitrates de la solution du sol est plutôt liée aux antécédents culturels et que le bilan hydrique est similaire pour une région et une culture données.



Toutefois, il ressort que les sols sableux présentent plus de risques que les loams, et que les sols argileux sont les moins vulnérables au lessivage.

## 6.4 Risques de déséquilibre nutritif

L'estimation des risques de déséquilibre nutritif demeure importante pour le contrôle de la pollution des eaux, sous l'hypothèse que les éléments non prélevés par les plantes et non retenus par le sol se retrouvent tôt ou tard dans les eaux. Ce déséquilibre découle d'une application d'engrais beaucoup plus importante que le prélèvement (théorique) par la plante. Bien que la fertilité des séries, en termes de teneur en NPK, soit variable d'une série à l'autre (Nolin et al. 1989), la prise en compte de certaines caractéristiques inhérentes du sol permet l'estimation d'indices de fertilité (texture, CEC, capacité de rétention du phosphore). Tel que vu précédemment, la déduction de la CEC à partir de la texture et la teneur en matière organique corrobore bien avec les données mesurées des rapports pédologiques (voir annexe 12). L'estimation de la fertilité en K corrobore aux données issues des enquêtes pédologiques, sauf pour quatre séries qui variaient d'une classe et n'ayant pas d'impact sur l'estimation des risques de déséquilibre nutritif (annexe 3 et tableau 32).

**Tableau 32. Risques de déséquilibre en NPK**

Unité	Fertilité en N	Déséquilibre en N <sup>a</sup>	Fertilité en K	Déséquilibre en K <sup>a</sup>	Capacité de rétention du P	Déséquilibre en P <sup>a</sup>
AC1	faible	1	faible	1	élevée	1
AI3	modéré	1	modérée	1	faible	1
BC4n	élevé	3	faible	3	modérée	3
CO	très élevé	3	très faible	3	faible	3
DA2	modéré	1	faible	1	faible	1
DU3jncqr	faible	3	faible	3	élevée	3
HY3	faible	1	modérée	1	faible	1
Jl3m	modéré	1	modérée	1	modérée	2
JS2	faible	1	faible	1	faible	2
PI3	faible	3	faible	3	modérée	3
PV5	élevé	1	très élevée	3	modérée	1
RS2	faible	1	faible	1	faible	1
TH1b	faible	1	faible	1	élevée	2
UB4	élevé	1	très élevée	3	modérée	3

Classes : faible (1), modéré (2), élevé (3)

L'évaluation de la capacité de rétention en phosphore a été comparée avec les classifications suggérées par Giroux et Tran (1986) et Tran et al. (1988) pour les unités cartographiques (12) dont les données en  $Al_{ox}$  étaient disponibles dans la base de données provenant des études pédologiques. Huit unités sur douze corrélaient bien avec l'une ou l'autre des classifications proposées comme le montre l'annexe 18.

L'estimation de la contribution du sol en azote (N) aux plantes, la fertilité en potassium (K) ainsi que les risques de déséquilibre en azote, phosphore (P) et potassium sont compilés

dans le tableau 33, selon l'hypothèse que 100% des besoins en azote du maïs sont comblés (150 kg/ha) (tableau 18) et pour les scénarios sur sols drainés et épandage au printemps et à l'été.

L'évaluation des risques de surfertilisation en azote et en potassium dépendent de l'aptitude des sols à supporter la production de maïs. Les unités Boucherville, Cousineau, Du Mont et Pierreville présentent des risques élevés pour cette raison. L'épandage d'automne présente surtout des risques pour l'azote compte tenu de sa mobilité dans les sols et de l'absence de couvert végétal. Les unités Providence et St-Urbain étant plus fertiles en potassium présentent également des risques malgré leur bonne aptitude à produire. Certains résultats reflètent les observations de Tabi et al. (1990) sur les séries de sols surfertilisées en P (St-Thomas) et en K (Providence, St-Urbain).

## 6.5 Classification globale

La classification des sols agricoles selon leur capacité à recevoir le lisier de ferme englobe essentiellement l'évaluation de la productivité potentielle et celle des risques de pertes. Sur la base d'une évaluation utilisant l'ensemble des critères présentés ci-haut, il est possible de déduire que les sols non drainés n'offriraient qu'une faible aptitude à recevoir du lisier de porc (tous classés 3 et 4). Sur les sols drainés, l'épandage au printemps de lisier non enfoui est également restrictif. Les unités Ste-Julie et Providence présentent des risques modérés pour l'épandage au printemps de lisier enfoui et des risques élevés pour les autres séries. La classification des sols drainés artificiellement et le ou les facteurs déterminants la classe figurent à l'annexe 19. Ces résultats, s'ils devaient déterminer les niveaux d'épandage, diminueraient substantiellement les superficies disponibles pour l'épandage. Toutefois, une amélioration de la gestion des terres et des pratiques d'épandage permettrait de changer la classification.

Les critères d'évaluation des risques de volatilisation et de débalancement nutritif sont fortement liés à des facteurs externes au sol (climatiques et anthropiques). En les éliminant, et en ne retenant que l'évaluation des risques de ruissellement et de lessivage, quatre séries de sols présentent de faibles risques de pertes vers les eaux de surface et souterraine, cinq présentent des risques modérés et quatre des risques élevés. Le tableau 33 présente l'estimation des superficies par classe selon les risques de pollution des eaux (ruissellement et lessivage) et de l'évaluation du potentiel de recyclage par le maïs sans tenir compte des scénarios d'épandage.

Si on tient compte de l'aptitude des sols à produire le maïs, les superficies réceptrices de classe 1 diminuent de 2.8%). Il ressort de cette analyse que 43% de la superficie totale évaluée présentent des risques élevés de pertes d'éléments nutritifs vers les eaux de surface ou souterraines. Concernant les 54% des sols classés moyens, certaines pratiques agricoles peuvent minimiser les risques perçus. *Par conséquent, les superficies réceptrices diminueraient d'environ du tiers par rapport à l'évaluation faite à partir d'un bilan agronomique.*

Toutefois, la capacité de réception du territoire varierait de la façon suivante si on tient compte du mode et de période d'épandage ainsi que de la dose appliquée (tableau 34). Au printemps et à l'automne, que 12% de la superficie évaluée présente des risques modérés et

84,5%, des risques élevés. À l'été, les risques sont faibles à modérés pour 97% de la superficie. Selon les critères diagnostiques retenus, on peut conclure que l'épandage en post levé par rampe est le moins dommageable pour les eaux de surface et souterraines. Par contre, le fait de satisfaire à 100 % les besoins en azote du maïs au printemps entraîne des risques élevés de pertes. Pour sa part, l'épandage d'automne présente des risques élevés même si le lisier est enfoui.

**Tableau 33. Estimation des superficies réceptrices par classe**

Risques de pollution des eaux (sans potentiel de recyclage)			Risques en tenant compte du potentiel de recyclage par le maïs		
Classe	Unités carto.	Superficie totale	Classe	Unités carto.	Superficie totale
1	Boucherville	541 hectares (3%)	1	Ste-Julie	36 hectares (0.2%)
	Cousineau			St-Urbain	
	Ste-Julie		2	St-Aimé	9725 hectares (54%)
	St-Urbain			St-Hyacinthe	
2	St-Aimé	9807 hectares (54%)	3	Providence	7874 hectares (43.5%)
	St-Hyacinthe			Achigan	
	Pierreville			Boucherville	
	Providence		St-Damase		
3	Ste-Rose	7869 hectares (43%)	Du Mont	582 hectares (3.2%)	
	Achigan		Joseph		
			St-Damase		St-Thomas
	Du Mont		4		Cousineau
Joseph	Pierreville				
St-Thomas					

L'application de la grille d'interprétation proposée par Hall (1976) à notre problématique fait ressortir son faible pouvoir discriminant : en effet, la grille de Hall classerait 100% de la superficie totale comme moyenne. Les résultats sont similaires en utilisant celle de McRae et Burnham (1981) : 54% classée moyenne et 46% présentant des risques élevés. Par contre, en calculant le Soil Potential Index (SPI) selon Heidlage et Shingleton (1984), 74% de des superficies présentent un bon potentiel de réception, 23% un potentiel moyen et 3% serait à éviter. L'évaluation du SPI exige la prise en compte de l'aptitude des sols à soutenir une culture alors que les résultats diffèrent légèrement avec ou sans ce critère dans le modèle ALES proposé et selon l'échantillon de sols retenus pour l'analyse. En effet, si les superficies des unités inaptes à la production étaient plus importantes, le résultat serait grandement affecté. L'annexe 20 compile ces résultats.

L'avantage d'utiliser le cadre de la FAO et l'approche système expert sur des méthodes plus générales est sa flexibilité et sa rapidité quant à l'identification du facteur limitant et la prise en compte de l'effet de mesures correctives sur la classification des sols. Un autre avantage indéniable est la possibilité d'exporter les résultats vers d'autres outils informatiques dont les systèmes d'information à référence spatiale. Ceci permet en plus des possibilités d'analyses spatiales, la réalisation de cartes thématiques telles que les zones vulnérables au lessivage ou à l'érosion hydrique ou offrant un bon potentiel de recyclage par les cultures ou encore des

cartes de capacité support face à ce type d'utilisation du sol. Le prochain chapitre aborde l'utilisation du système d'interprétation de données pédologiques en tant qu'outil pour le contrôle de la pollution d'origine agricole.

**Tableau 34. Superficies réceptrices selon différents scénarios d'épandage<sup>a</sup>**

Printemps <sup>b</sup> et automne			Été post levé		
Classe	Unités carto.	Superficie totale	Classe	Unités carto.	Superficie totale
2	JI3m		1	JI3m	36
2	PV5	2 243	1	UB4	(0,2 %)
2	UB4	(12,3 %)	2	AC1	
3	AC1		2	AI3	
3	AI3		2	DA2	
3	BC4n		2	HY3	
3	DA2		2	JS2	
3	DU3jncqr		2	PV5	17 554
3	HY3		2	RS2	(96,8 %)
3	JS2		2	TH1b	
3	RS2	15 392	3	BC4n	45
3	TH1b	(84,5 %)	3	DU3jncqr	(0,3 %)
4	CO	582	4	CO	582
4	PI3	(3,2 %)	4	PI3	(3,2 %)

<sup>a</sup>Sur sols drainés, <sup>b</sup>Enfoui et non enfoui



# **Chapitre 7**

## **Utilisation du système expert**



## 7. UTILISATION DU SYSTÈME EXPERT

---

La situation de surplus d'engrais de ferme et la dégradation de la qualité de l'eau sur plusieurs bassins versants québécois démontrent, comme il a été fait mention, la nécessité d'une rationalisation de l'utilisation des terres agricoles comme lieu de disposition des engrais de ferme. Actuellement, cette rationalisation est de type normatif et nominal. Elle restreint la densité animale permise sur un territoire donné en fonction des superficies disponibles pour l'épandage des déjections animales. Ces superficies sont estimées à partir des besoins en azote des diverses cultures qui y sont produites. Pourtant, plusieurs autres facteurs influencent le transport des éléments nutritifs et l'ampleur des problèmes de pollution. Les sols diffèrent dans leur capacité à retenir les éléments nutritifs et à supporter la production d'une culture. La capacité d'assimilation des cours d'eau varie également d'une région à une autre. La méthode actuelle d'évaluer la capacité de réception est contestée tant par les éleveurs comme étant trop restrictive que par la population comme étant inefficace dans le contrôle de la pollution diffuse.

Que ce soit pour l'établissement d'une norme d'épandage, d'une taxe sur les rejets ou d'un droit d'épandage, toute mesure de contrôle de la pollution d'origine agricole (volume 2) exige la définition de la capacité de réception du milieu, soit son aptitude physique à recevoir des charges d'engrais de ferme. Cette définition serait centralisée si elle s'applique à l'ensemble de la province, par exemple. Elle serait décentralisée si elle s'applique à un bassin versant spécifique et qu'elle serait définie selon les contraintes (physiques et sociales) observés sur ce bassin. Puisque les problèmes de pollution sont souvent locaux, le niveau de dépollution varie selon les régions tant au niveau de l'intensité des activités humaines (utilisation du territoire) que de leur environnement physique distinct (géologie, climat, pédologie, etc.), la méthode utilisée pour l'évaluation de la capacité de réception se doit d'être flexible pour tenir compte de ces disparités régionales.

C'est dans cet esprit que seront analysés la méthode retenue pour l'évaluation de la capacité de réception et le système expert développé pour l'interprétation des données pédologiques. Dans un premier temps, la méthode utilisée permet-elle une définition satisfaisante de la capacité de réception? La méthode et l'outil informatique sont-ils flexibles? Dans quelle mesure le système développé est-il applicable à d'autres régions et à d'autres échelles géographiques?

Le présent travail suggère une classification des sols selon leurs aptitudes physiques à recevoir des engrais de ferme. L'objectif poursuivi était d'intégrer le facteur "sol" dans l'évaluation de la capacité de réception et d'estimer les superficies disponibles pour l'épandage à partir de la classification obtenue. Différents critères diagnostiques ont été identifiés et utilisés à cette fin. Les résultats obtenus ont été présentés au chapitre précédent.

### **Définition de la capacité de réception**

La classification des sols selon leur capacité de réception est déduite à partir de paramètres que les producteurs agricoles peuvent contrôler à l'échelle de leur exploitation. Dans une étude sur l'efficacité de droits de produire pour le contrôle de la pollution diffuse, Kozloff et al. (1993) ont démontré que la définition des droits de produire par rapport à la qualité de



l'eau du principal cours d'eau du bassin permet une meilleure prise en compte des facteurs sociaux (tolérance à la pollution, objectif de qualité de l'eau). Par contre, la définition des droits de produire selon la contribution potentielle des parcelles à la pollution des eaux de surface s'est avéré un incitatif efficace pour les agriculteurs<sup>42</sup>. Le facteur discriminant retenu était le potentiel d'érosion des sols<sup>43</sup>. Les principaux avantages relevés sont l'estimation relativement facile de ce potentiel à partir des caractéristiques des sols et l'intérêt accru des producteurs envers le contrôle de la pollution lorsque les droits de produire sont définis à partir de paramètres qu'ils peuvent contrôler à l'échelle de leur exploitation. Aussi, un producteur pourrait contester l'évaluation en produisant un plan de fertilisation intégré certifié par des professionnels reconnus par l'organisme responsable du contrôle de la pollution, tel que le suggère le récent projet de règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole. Cette mesure permettrait de réduire les coûts d'acquisition de données en laissant aux producteurs la responsabilité de démontrer l'efficacité de leurs efforts envers la protection de l'environnement.

Dans le modèle d'évaluation développé, seul le choix des critères permet un lien avec les considérations sociales d'amélioration de la qualité des eaux et la prise en compte des disparités régionales. Par exemple, le projet de restauration de la rivière Boyer nécessite la protection des frayères d'éperlan arc-en-ciel. Le facteur limitant pour définir la capacité de réception des terres avoisinantes pourrait être l'érosion hydrique. Un pH élevé dû à une forte concentration d'azote ammoniacal dans la partie aval de la rivière Etchemin freine sa réhabilitation en tant que rivière à saumon. Sur cette partie du bassin, la capacité de réception pourrait être définie en fonction des risques de pertes par ruissellement et érosion hydrique et des doses d'azote épandues<sup>44</sup>. De plus, les limites de classe peuvent varier selon les objectifs de qualité de l'eau désirés par la population face à la pollution et l'usage de la ressource eau à récupérer (facteurs politiques et économiques). Ainsi, la méthode s'avère flexible puisqu'elle s'ajuste aux particularités socio-économiques et bio-géophysiques des régions et aux divers objectifs agro-environnementaux.

D'après les résultats obtenus et comparés à ceux provenant de la littérature et de l'enquête auprès des experts, le système expert développé permet d'évaluer la capacité de réception de façon satisfaisante selon les résultats obtenus de l'échantillon. De même, l'échelle utilisée (1:20,000) permet d'atteindre des résultats fiables en raison de la précision des données compte tenu de la densité d'échantillonnage requise à cette échelle<sup>45</sup>. Ainsi, l'adaptation du cadre d'évaluation des terres de la FAO pour classer les sols en fonction de leur capacité à

---

<sup>42</sup> *Les agriculteurs sont plus incités vers des mesures visant à réduire leurs coûts de production et leur perte en productivité causée par l'érosion des sols que par des mesures visant à réduire les dommages en aval.*

<sup>43</sup> *Les agriculteurs sont plus incités vers des mesures visant à réduire leur perte en productivité causée par l'érosion de leurs sols que par des mesures visant à réduire les dommages en aval. Les auteurs notent également l'augmentation du coût d'acquisition des données avec la grandeur du bassin, malgré l'économie d'échelle de leur traitement par ordinateur.*

<sup>44</sup> *Environnement Shooner inc., Étude de pré faisabilité sur la réintroduction du saumon dans la rivière Etchemin, 1993.*

<sup>45</sup> *La superficie minimale visible à cette échelle est d'environ 2 ha alors qu'à l'échelle de 1:50 000, elle est d'environ 12,5 ha (Coen 1987).*

supporter les activités d'épandage pourrait satisfaire à la fois les producteurs agricoles et les besoins du responsable du contrôle de la pollution. L'utilisation d'un système expert, tel que proposé dans ce travail, permettrait d'identifier rapidement les facteurs limitants et de reclasser les sols en fonction des mesures correctrices apportées par le producteur. Par contre, il importe que les terres à l'intérieur d'une même classe soient similaires quant à la sévérité des limitations, et non selon le type de limitations.

Compte tenu des contraintes socio-économiques actuelles, la méthode utilisée permet de cibler rapidement les zones à risque et les mesures d'atténuation efficaces en utilisant des données actuellement disponibles et par l'évaluation de différents scénarios d'épandage. Par contre, dans le présent travail, la définition de la capacité de réception du milieu s'arrête à l'aptitude intrinsèque des sols. Elle fournit un portrait à partir de caractéristiques relativement stables des sols. Elle permet d'estimer, sous forme d'évaluation de risques, les impacts à long terme de l'épandage annuel d'engrais de ferme ou du drainage des terres agricoles. Aussi, ce type d'évaluation ne peut tenir compte des cinétiques des éléments dans les sols (activité des micro-organismes, cycle de l'azote et du phosphore). Elle ne tient pas compte de l'évolution de l'utilisation des terres dans l'espace et le temps. Toutefois, il est possible d'imaginer une mise à jour rapide de l'utilisation du territoire (surfaces par type de culture) à l'aide d'images satellitaires. Toutefois, l'influence de ces éléments et des facteurs anthropiques est considérée par la définition de types d'utilisation qui permet de simuler des scénarios d'épandage.

### **Flexibilité de la méthode**

Est-ce que les résultats seraient similaires avec l'application du système expert à une autre région québécoise où l'information pédologique est à l'échelle de 1:63 000, comme c'est le cas actuellement par la région de Lanaudière et de la Chaudière? Cette question réfère à la flexibilité de l'outil et son coût d'application, car à quoi bon développer un outil s'il n'est valide que pour une région et pour une échelle géographique donnée. Un problème inhérent à l'échelle géographique est la confiance avec laquelle les propriétés des sols peuvent être prédites en tout point de la carte. Cette fiabilité de l'information pédologique<sup>46</sup> dépend d'une part, de la complexité du paysage et des processus pédogénétiques et, d'autre part, de la densité de la prospection, de la précision de la définition des séries et des unités cartographiques ainsi que de l'expérience des ressources humaines (Nolin et Lamontagne, 1991).

Ainsi, la transposition du système expert développé à une plus petite échelle (1:63 360) nécessite une vérification sur le terrain de l'information pédologique actuelle sur les unités cartographiques, tout particulièrement dans les Appalaches de géomorphologie plus complexe que le Bouclier Laurentien. Le degré de généralisation de l'information est naturellement plus élevé qu'à l'échelle du 1:20 000. Le logiciel ALES permet la prise en

---

<sup>46</sup>La fiabilité est liée à la variabilité des sols et de leurs descripteurs, variabilité qui est temporelle et spatiale. La variabilité temporelle dépend de la période de l'étude (souvent durant la saison végétative) et de la fréquence des mesures. Le travail du sol et le climat affectent cette variabilité par leur influence sur les activités biochimiques du sol et sur la croissance des plantes. Pour sa part, la variabilité spatiale des sols s'observe de façon latérale et verticale. La variabilité latérale peut être très importante. Les principaux facteurs l'affectant sont l'utilisation du sol et sa gestion ainsi que les différents aménagements. Cette variabilité latérale dépend de l'échelle, du milieu étudié, de la nature des sols et du descripteur analysé. En général, elle augmente avec la taille de la superficie.

compte d'unité cartographique composite. Aussi, l'avantage de ALES est qu'il permet de changer facilement les arbres de déduction ou, le cas échéant, de les compléter si les données sont manquantes. Par exemple, la capacité de rétention de l'eau, le drainage, la perméabilité, la teneur en matière organique peuvent être déduites à partir de la texture. Dans les régions plus froides du Québec (au nord du lac St-Pierre), la teneur en matière organique est plus importante en raison d'un taux de minéralisation plus faible. Aussi, les limites de classe devraient changer pour ces régions comme l'ont suggéré les experts consultés. Par exemple, la classe faible serait <5% de matière organique, la classe modérée de 5 à 8%.

Sur la base des résultats, il est permis d'admettre que le système développé s'appliquerait à une échelle plus générale comme celle du 1:63 360 (cartes pédologiques provinciales). Ainsi, si l'échantillon des sols utilisé dans cette étude permet d'évaluer la pertinence de la méthode, il importe d'appliquer le modèle à l'ensemble des sols du sud-est de la plaine de Montréal afin de vérifier la justesse des observations. Aussi, une autre méthode de validation serait d'appliquer le système d'évaluation à un petit bassin versant afin de comparer les résultats avec les données de qualité de l'eau des cours d'eau d'amont en aval du bassin et les données d'utilisation du territoire (volume d'engrais minéraux utilisés et d'engrais organiques générés, type de culture, etc.).

### **Couplage avec l'analyse spatiale et gestion des surplus**

ALES offre une interface avec IDRISI, un système d'information géographique (SIG). Aussi, les résultats de classification pour chaque aptitude et chaque qualité de sol évaluées peuvent être importés dans un SIG, devenir une couche d'information et produire une carte, par exemple, une carte des aptitudes à produire du maïs-grain, une carte de vulnérabilité au ruissellement, etc.

En ce qui a trait à la prise en compte de la proximité des plans d'eau, un SIG ou système à référence spatiale permettrait la superposition du réseau hydrographique à la carte de capacité de réception. Pour la gestion des surplus et l'applicabilité d'une politique de contrôle, la superposition du réseau routier à la carte de capacité de réception ferait le lien entre les zones de concentration d'élevage et le milieu récepteur, facteur important puisque la distance entre les lieux d'épandage et la fosse d'entreposage est un facteur économique limitant (temps et carburant). L'analyse spatiale est également intéressante pour la comparaison entre l'offre et la demande de superficies disponibles pour l'épandage et leur capacité réceptrice en éléments nutritifs, l'offre à partir de la fosse d'entreposage et la demande en superficies d'épandage, correspondant ici à l'unité cartographique.

### **Avenues de recherche**

Cette méthode d'évaluation des terres s'appliquerait également bien, par exemple, l'évaluation de la valeur foncière en milieu rural. En tenant compte de la productivité potentielle des terres, la valeur foncière ne serait plus évaluée selon la valeur des terres voisines, mais sur sa valeur intrinsèque, ce que permet la précision des données à l'échelle du 1:20 000. Pour une région donnée, l'évaluation économique basée sur la productivité potentielle permettrait d'évaluer et cibler les types d'utilisation des terres les plus rentables (économiquement et environnementalement), (par exemple, la culture de ginseng, d'atocats, etc.).

Il appert que le développement de systèmes expert pour l'interprétation des données pédologiques à l'aide de ALES est une approche à privilégier à des fins exploratoires (évaluations rapides de scénarios, simulations de politiques) et lorsque certaines données sont manquantes et peuvent être déduites à partir de données plus générales. Aussi, les avenues de recherche pour l'amélioration du système sont la validation des déductions des caractéristiques secondaires telles que 1) la fertilité en potassium de la couche de surface en appliquant le modèle à un échantillon plus large de sols, 2) vérifier l'hypothèse du comportement des sols une fois drainés artificiellement ou 3) ajouter les données climatiques à l'arbre de décision de l'aptitude physique des terres à produire du maïs et comparer l'estimation de la productivité potentielle faite à partir des caractéristiques des sols avec les données statistiques de la Régie des assurances agricoles du Québec.



## **Conclusion**



## CONCLUSION

---

L'objectif de ce travail était d'intégrer le facteur "sol" dans l'évaluation de la capacité de réception d'un territoire donné face aux activités d'épandage d'engrais de ferme. Ce travail a permis d'appliquer et d'évaluer l'adaptation du cadre d'évaluation des terres de la FAO et le logiciel ALES à une problématique environnementale, telle que le contrôle de la pollution de l'eau en milieu agricole.

Dans les premiers chapitres, l'importance du facteur "sol" dans la définition de la capacité de réception a été démontrée. En effet, le mouvement de l'eau sur et dans les sols gouverne les pertes d'éléments vers les eaux souterraines et de surface, pertes dont l'ampleur dépend de plusieurs processus physiques et biochimiques. La texture et la stratigraphie des sols commandent ce mouvement de l'eau d'où le choix d'évaluer indirectement la capacité de réception des sols à partir des séries de sols. La disponibilité des données pédologiques sous forme de rapports et de cartes a également motivé ce choix. Au Québec, on retrouve pour la plaine de Montréal des études à l'échelle du 1:20 000 et pour les autres régions, à l'échelle du 1:63 360 et finalement, des cartes de pédo-paysage au 1:1 000 000.

L'approche système expert a été retenue en raison de sa flexibilité et de la précision des données en classe disponibles. Le système expert a été développé à l'aide du logiciel ALES spécifiquement conçu pour l'évaluation des terres selon le cadre proposé par la FAO. ALES permet, entre autres, l'exploitation de données classifiées ordinales ou nominales. L'échantillon comptait quatorze unités cartographiques de sols de la plaine de Montréal. L'information pédologique provient de rapports et cartes publiés récemment à l'échelle du 1:20 000. La précision et la fiabilité de l'information à cette échelle permettaient de comparer des données déduites avec le modèle avec les données observées ou mesurées en laboratoire. La culture et le fertilisant organique retenus pour l'étude était le maïs et le lisier de porc.

Dans la méthode d'évaluation proposée, la définition de la capacité de réception consiste à une évaluation environnementale de deux composantes. La première estime le potentiel de recyclage des éléments nutritifs épandus par les cultures à partir de l'aptitude des sols à supporter la production d'une culture donnée. Ainsi, l'estimation des rendements potentiels a permis de déduire la quantité d'éléments (NPK kg/ha) potentiellement prélevés par le maïs. La deuxième composante s'appuie sur l'évaluation des risques de pertes à l'environnement des éléments nutritifs contenus dans le lisier de porc. L'hypothèse retenue était que 100% des besoins en azote du maïs serait comblé par le lisier (150 kg/ha). Parmi, les critères utilisés, l'évaluation des risques de ruissellement et d'érosion hydrique et des risques de lessivage définissent le mieux les risques environnementaux. Les risques de volatilisation dépendent essentiellement de facteurs externes au sol. Les risques de surfertilisation sont reliés non seulement à l'aptitude du sol à produire une culture, mais ils sont également fortement influencés par des facteurs anthropiques. L'approche utilisée permet toutefois d'évaluer différents scénarios par la définition de types d'utilisation des terres.

Les unités cartographiques ont été classifiées en fonction de cette capacité sur la base des qualités permanentes et des caractéristiques des terres. Environ 55% de la superficie couverte par ces séries était apte à moyennement apte à recevoir des engrais de ferme. Le



reste de la superficie présentait des risques environnementaux élevés (43%) ou était inapte (3%). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus en utilisant une grille d'interprétation destinée à l'installation de champs d'épuration. Par contre, ils étaient plus pessimistes sur les superficies disponibles que les résultats obtenus avec le Soil Potential Index. L'avantage de la méthode est qu'elle permet d'évaluer l'impact du mode et de la période d'épandage sur la capacité de réception.

Néanmoins, l'enquête auprès des experts a permis de conclure que la logique du système expert développé traduisait bien leur conception des risques environnementaux. Il aurait été souhaitable que le modèle construit sur ALES soit sous forme de démonstration informatique. Alors, les experts auraient pu commenter non seulement sur la méthode mais également sur la facilité et la flexibilité de l'outil informatique et explorer de façon plus approfondie, peut-être, les résultats à l'aide de la fonction explicative de ALES. Toutefois, dans l'ensemble, les résultats de l'enquête et de la comparaison avec des résultats tirés de la littérature permettent de conclure que la logique, traduite sous forme d'arbres de décision, représente l'avis des experts.

Le système expert permet une estimation rapide de la capacité de réception d'un territoire face aux activités d'épandage de lisier de porc. Par contre, sa validation demande une comparaison des résultats de la productivité potentielle avec des données statistiques sur les rendements de la région d'étude et une application sur un petit bassin versant agricole. D'une part, la précision obtenue avec le degré de généralité qu'offre l'utilisation de moyennes pourrait être vérifiée, notamment au niveau des données climatiques et de rendements moyens utilisés dans le modèle pour l'évaluation des rendements potentiels. La prise en compte de la diversité des cultures (céréales, fourrages, vergers et autres), des types d'engrais de ferme utilisés et des diverses gestions des sols est essentielle pour l'estimation du recyclage potentiel des éléments nutritifs par les cultures sur un territoire donné. Ceci nécessite la disponibilité des superficies en culture pour chaque type de culture. Dans quelle mesure la prise en compte des diverses gestions du sol influence les pertes à l'environnement? Reste à se demander si la classification des sols serait différente avec l'ajout de ces paramètres et si le coût associé à leur prise en compte est justifié.

En utilisant les données actuellement disponibles sur la qualité de l'eau de certains tronçons de rivière, l'application à un petit bassin agricole permettrait d'établir le lien entre la classification obtenue et la qualité de l'eau du cours d'eau tel que discuté au chapitre précédent. Si les données sont disponibles, la définition de la capacité de réception pourrait, bien entendu, être raffinée à l'aide de modèles mathématiques comme la contribution des épandages à la concentration en nitrates de l'aquifère ou l'évaluation des risques d'érosion des sols. L'utilisation d'un SIG améliore également les possibilités du système ALES en permettant l'analyse spatiale et la production de cartes thématiques.

Il ressort de cette étude que le système développé s'avère un outil intéressant d'aide à la prise de décision. Il permet la prise en compte des disparités régionales, facteur important d'équité et d'efficacité dans l'élaboration et l'application de politiques tant environnementales qu'agricoles. Aussi, le choix d'un mécanisme de contrôle et son applicabilité peuvent être vérifiés rapidement. Le système permet également une analyse économique de différents scénarios d'épandage et des mécanismes de contrôle.

# **Bibliographie**



## BIBLIOGRAPHIE

---

- Anonyme (1973). *Soil Survey, San Diego Area, California*, USDA, Soil Conservation Service and Forest Service, pp. 31-39.
- (1987). *Valorisation agricole des boues de stations d'épuration des eaux usées municipales, Guide de bonnes pratiques*. Ministère de l'Environnement du Québec.
- Banton, O., S. Jordana et M. Larocque (1993). *Fèces, logiciel d'évaluation du bilan environnemental des fertilisants organiques, Manuel de l'utilisateur*. Rapport scientifique (version préliminaire). Ste-Foy, INRS-Eau.
- Barber, S.A. (1984). *Soil Nutrient Bioavailability, A Mechanistic Approach*. New York, John Wiley & Sons, pp.39-41.
- 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*, (Cahiers de l'ACFAS no. 37), M. Nolin (éd.), pp.3-24. Chicoutimi, mai. Québec: ACFAS.
- Beauchamp, E.G. (1986). Availability of Nitrogen from Three Manures to Corn in the Field. *Can. J. Soil Sci.* 66: 713-720.
- (1983). Response of Corn to Nitrogen in Preplant and Sidedress Applications of Liquid Dairy Cattle Manure. *Can. J. Soil Sci.* 63: 377-386.
- Beauchamp, E. G., G.E. Kidd et G. Thurtell (1982). Ammonia Volatilization from Liquid Dairy Cattle Manure in the Field. *Can. J. Soil Sci.* 62: 11-19.
- Bernard, C. (1990). La conservation de l'eau par la gestion des sols. Dans: *Colloque sur la conservation de l'eau en milieu agricole*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.), pp. 181-195. Québec, 12-13 février. Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- (1988). Érosion hydrique et pollution diffuse. *Agrosol*. 1 (1): 21-29.
- Bouchard, S. et al. (1987). La problématique de la gestion environnementale du lisier de porc. *70ème Congrès canadien de chimie*, Québec.
- Bouma, J. et A.K. Bregt (1989). *Land Qualities in Space and Time*. Pays-Bas, Pudoc Wageningen, 352 p.
- Brady, N.C. (1974). *The Nature and Properties of Soils*. New York, MacMillan Publishing Co., 639 p.
- Breeuwsma, A. et al. (1986). Derivation of Land Qualities to Assess Environmental Problems from Soil Surveys. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50: 186-190.

- Burrough, P.A. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford, U.S.A, Clarendon press, 194 p.
- Campbell, C.A. (1984). Mineralization Rate Constants and their Use for Estimating Nitrogen Mineralization in some Canadian Prairie Soils. *Can. J. Soil Sci.* 64: 333-43.
- Chénard, F. et M.C. Nolin (1987). L'interprétation agronomique des données pédologiques: définitions et concepts. Dans: *Journée d'information scientifique sur l'interprétation agronomique des données pédologiques*, M. C. Nolin et M. Mélançon (éds) pp.22-35. Québec, 27 octobre. Québec: Conseil des productions végétales du Québec, M.A.P.A.Q.
- Chisholm, P.S., R.W. Irwin et C.J. Acton (1984). Interpretation of Soil Drainage Groups from Soil Taxonomy - Southern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 64: 383-393.
- Cipra, J.B. et al. (1972). Variations with distance in selected fertility measurements of pedons of Western Kansas Ustoll. *Soil Sci. Soc. Amer. J. Proc.* 36: 111-115.
- Clay, D.E., G.L. Malzer et J.L. Anderson (1990). Ammonia Volatilization from Urea as Influenced by Soil Temperature, Soil Water Content, and Nitrification and Hydrolysis Inhibitors. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 54: 263-266.
- Coen, G.M. (éd.) (1987). *Manuel de prospections pédologiques*. Vol.1. CRT Contr. no. 85-30. Direction générales de la recherche. Agriculture Canada.
- Collectif (1991). *Qualité des sols dans le contexte canadien-1988*, CRT Contr. no 89-12. Ottawa, Mathur, S.P. et C. Wang (éds). Agriculture Canada, 73 p.
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) (1982). *Rapport du colloque sur les fumiers*. (Agdex 538). Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Comité d'experts sur la prospection pédologique d'Agriculture Canada (1982). *Système d'information des sols au Canada (SISCan), Manuel de description des sols sur le terrain*. (IRT Contrib.no.82-52). Ottawa, Agriculture Canada, 109 p.
- Cook, D.J., N.T. Dickinson et R.P. Rudra (1985). *GAMES: Guelph model for evaluating the effects of agricultural management systems on erosion and sedimentation - user's manuel*. Ontario, School of Engineering, University of Guelph.
- Côté, D. (1994). Des recherches sur la fertilisation avec les engrais de ferme. *Le producteur de lait québécois*. 14 (6): 18-21.
- (1992). Optimisation de la valeur fertilisante dans le système cultural. Dans: *Colloque sur la gestion des fumiers, Rien ne se perd, rien ne se crée*, Conseil des productions végétales du Québec, pp. 215-247. Drummondville, 20-21 octobre. Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

- Côté, D., M. Giroux et A. Ndayegamiye (1991). Étude de la fertilisation du maïs en postlevé avec du fumier solide de bovin laitier: faisabilité et critères d'efficacité. *Agrosol*. 4 (2): 33-38.
- Culley, J.L.B. et al. (1981). Soil Chemical properties and Removal of Nutrients by Corn Resulting from Different Rates and Timing of Liquid Dairy Manure Applications. *Can. J. Soil Sci.* 61: 35-46.
- Dales, J. H. (1968). Land, Water, and Ownership. *Can. J. Econ.* 1 (4): 791-804.
- De Jong, R., C.A. Cambell et W. Nicholaichuk (1983). Water Retention Equations and their Relationship to Soil Organic Matter and Particle Size Distribution for Disturbed Samples. *Can. J. Soil Sci.* 63: 291-302.
- Denholm, K.A. (1987). *Soil Potential Ratings for Grain-corn and Barley production in Richelieu County, Québec*. Ph.D. dissertation. Ste-Foy, Université Laval.
- Dent, D. et A. Young (1981). *Soil Survey and Land Evaluation*. London, George Allen & Unwin, 278 p.
- Doucet, R. (1992). *La science agricole*. Eastman, Québec, Éditions Berger. 699 p.
- Drury, C.F. et E.G. Beauchamp (1991). Ammonium Fixation, Release, Nitrification, and Immobilization in High- and Low-Fixing Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 55: 125-129.
- FAO (1976). *Cadre pour l'évaluation des sols*. Rome, ONU. 64 p.
- Ferguson, R.B. et al. (1984). Ammonia Volatilization from Surface Applied Urea: Effect of H<sup>+</sup> Buffering Capacity. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 48 (3): 578-582.
- Fortin, R., M. Couture, L. Ménard et G. Parent (1992). État de la situation de la gestion des surplus par bassin. Dans: *Colloque sur la gestion des fumiers, Rien ne se perd, rien ne se crée*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.), pp. 324-356. Drummondville, 20-21 octobre. Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Gangbazo, G., A. R. Pesant, D. Cluis et J. P. Charest (1992). Effets des pratiques conventionnelles d'épandage du lisier de porc et des engrais minéraux sur la charge de nitrates dans les eaux de ruissellement et de drainage. Dans: *Symposium sur la recherche et le développement en gestion environnementale des effluents d'élevage au Québec*, Ministère de l'Environnement du Québec, pp. 27-34. L'Hotel Québec, 9-10 septembre 1992. Québec:
- Gangbazo, G. (1991). *Effets des événements hydrologiques sur les pertes d'azote et de phosphore suite à l'épandage de lisier de porc*. Ph.D. dissertation, Ste-Foy, INRS-Eau.
- Gangbazo, G. et J. Buteau (1985). *Analyse de la gestion des fumiers dans le bassin versant de la rivière Chaudière, État de la situation et éléments de solution*. Québec, Ministère de l'Environnement du Québec.

- Giroux, M. (1993). La fertilisation rationnelle des cultures. *Colloque sur la gestion de l'eau "L'eau de demain, quel héritage laisserons-nous?"*. Conseil des productions végétales du Québec (éd.), pp.117-138. Ste-Hyacinthe, 20-21 avril. Québec:Ministère de l'Alimentation, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Giroux, M. (1991). Effet de différents systèmes culturaux sur l'évolution à long terme des propriétés biologiques, la fertilité et la production des sols. *Agrosol*. 4 (2): 7-15.
- (1988). La pollution diffuse par les nitrates. *Agrosol*. octobre: 35-39.
- Giroux, M. et T.S. Tran (1989). La fertilisation azotée intégrée des céréales. *Agrosol*. 2 (1): 19-26.
- (1985). Évaluation du phosphore assimilable des sols acides avec différentes méthodes d'extraction en relation avec le rendement de l'avoine et les propriétés du sol. *Can. J. Soil Sci.* 69: 47-60.
- Grimard, Y. (1990). Qualité générale de l'eau au Québec. Dans: *Colloque sur la conservation de l'eau en milieu agricole*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.), pp.24-36. Québec, 12-13 février. Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Hahn R.W. (1989). *A Primer on Environmental Policy Design*. New York, Harwood Academic Publishers. 135 p.
- Huisingh, D., L. Martin, H. Hilger et N. Seldman (1986). *Proven profits from pollution prevention: Case studies in resource conservation and waste reduction*. Washington, Institute for local self-reliance, 316 p.
- Izuno, F.T., et al. (1991). Phosphorus concentrations in drainage water in the Everglades Agricultural Area. *J. Environ. Qual.* 20 (3): 608-619
- Keeney, D. R. (1983). Transformation and Transport of Nitrogen. Dans: *Agricultural Management and Water Quality*, Schaller, F.W. et G.W. Bailey (éds), pp. 48-64. Ames, Iowa State University Press.
- Kozloff, K.E.A. (1992). Microtargeting the Acquisition of Cropping Rights to Reduce Nonpoint Source Water Pollution. *Water Resour. Res.* 28 (3): 623-628.
- Lagacé, R. (1978). Le ruissellement à l'origine des débits. Dans: *6ème Colloque de Génie rural*, Université Laval, Québec, 21 p.
- Lal, R. (1985). A Soil Suitability Guide for Different Tillage Systems in the Tropics. *Soil Till. Res.* 5: 179-196.
- Lalonde, Girouard, Letendre et Ass. Ltée (1990). *Analyse de la situation des surplus de lisier de la région de la La Yamaska*. (Rapport final). Québec: Ministère de l'Environnement du Québec.

- Lamontagne, L. (1991). *Étude pédologique du comté de St-Hyacinthe (Québec)*. Ste-Foy, Équipe pédologique du Québec, Agriculture Canada. Contr. no. 89-25, 2 volumes.
- Lamontagne, L. et M.C. Nolin (1990). *Étude pédologique du comté de Verchères (Québec)*. Ste-Foy, Équipe pédologique du Québec, Agriculture Canada. Contr. no. 87-92, 2 volumes.
- Latreille, A., W. Smoragiewicz et A. Boutard (1993). La pollution agricole diffuse: une évaluation pour la grande région de Montréal. *Sci. Techn. Eau*. 26 (2): 103-107.
- Larsen, D.P. et al. (1988). A Regional Approach for Assessing Attainable Surface Water Quality: An Ohio Case Study. *J. Soil Water Conserv.* 43 (2): 171-176.
- Lein, J.K. (1993). Applying Expert Systems Technology to Carrying Capacity Assessment: a Demonstration Prototype. *J. Environ. Manage.* 37: 63-84.
- Lemelin, M. et al. (1992). La gestion de l'alimentation du porc: un moyen efficace de réduction des effluents et du volume de lisier. Dans: *Colloque sur la gestion des fumiers, Rien ne se perd, rien ne se crée*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.), pp. 63. Drummondville, 20-21 octobre. Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Levin, S.A. (1992). The Problem of Pattern and Scale in Ecology. *Ecology*. 73 (6): 1943-1967.
- Lok, S.C. et M. Phipps (1981). Calculating Indices of Land Suitability for agricultural Crops: An Interactive Numerical Technique. *J. Soil Water Conserv.* nov-déc: 351-354.
- Mar, B.W. (1971). A System of Discharge Rights for the Management of Water Quality. *Water Resour. Res* 7 (5): 1079-1086.
- Marshall, I.B., J. Dumanski, E.C. Hoffman et P.G. Lajoie (1979). *Soil capability and land use in the Ottawa urban fringe*. Ottawa, Land resource Research Institute, Research Branch, Agriculture Canada, 59 p.
- Martel, Y.A. et M.R. Laverdière (1976). Facteurs qui influencent la teneur de la matière organique et les propriétés d'échange cationique des horizons Ap des sols de grande culture du Québec. *Can. J. Soil Sci.* 56: 213-221.
- Martin, A. et M.C. Nolin (1991). *Étude pédologique du comté de Chambly (Québec)*. Ste-Foy, Équipe pédologique du Québec, Agriculture Canada. Contr. no. 89-26, 2 volumes.
- McKeague, J.A., C. Wang et G.M. Coen (1986). *Describing and interpreting mineral soils- a preliminary report*, (LRRI Contrib. no.84-50). Ottawa, Agriculture Canada, 47 p.
- McRae, S.G. et C.P. Burnham (1981). *Land Evaluation*. New York, Oxford University Press. 239 p.



- Migué, J.L. et R. Marceau (1993). Pollution Taxes, subsidies and Rent Seeking. *Can. J. Econ* 26 (2): 355-365.
- Miller, M.H. (1990). Impact of Nutrient Use in Crop Production on Water Quality. Dans: *Colloque sur la conservation de l'eau en milieu agricole*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.), pp. 139-149. Québec, 12-13 février. Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Moons, D. E., S. Ulansky, S.C. Jeck et B. Stennes (1994). *Abbotsford Aquifer Agriculture Information System Pilot Study*, Colombie Britannique: Agriculture Canada.
- Mount, H.R. et D. Chase (198 ). *Soil potential ratings for corn silage and grass legume hay, Cheshire County, New Hampshire*. Cheshire County Conservation District, U.S.Department of Agriculture, 35 p. et annexes.
- Myers, R.J.K. et al. (1982). Quantitative Relationship Between Nitrogen Mineralization and Moisture Content of Soils. *Can. J. Soil Sci* 62 (1): 111-124.
- N'dayegamiye, A. et D. Côté (1989). Effect of Long-Term Pig Slurry and Solid Cattle Manure Application on Soil Chemical and Biological Properties. *Can. J. Soil Sci* 69: 39-47.
- Nelson, D.W. et T. J.Logan (1983). Chemical Processes and Transport of Phosphorus. Dans: *Agricultural Management and Water Quality*, F. W. Schaller et G. W. Bailey (éds), pp. 65-91. Ames: Iowa State University Press.
- Nolin, M.C. et M.J. Caillier (1992). La variabilité des sols. 1- Composantes et causes. *Agrosol*. 5 (1): 15-20.
- (1992). La variabilité des sols. 2- Quantification et amplitude. *Agrosol*. 5 (1): 21-32.
- (1992). La variabilité des sols. 3- Stratégies d'échantillonnage. *Agrosol*. 5 (2): 69-76.
- Nolin, M.C., M.J. Caillier et C. Wang (1991). Variabilité des sols et stratégie d'échantillonnage dans les études pédologiques détaillées de la plaine de Montréal. *Can. J. Soil Sci*. 71: 439-451.
- Nolin, M.C., L. Lamontagne et A.Martin (1991). Esquisse géopédologique du sud-est de la plaine de Montréal. *Agrosol*. 4 (2): 44-57.
- Nolin, M.C. et L. Lamontagne (1991). Fiabilité d'une étude pédologique détaillée réalisée en terrain plat. *Can. J. Soil Sci*. 71: 339-353.
- Nolin, M.C., C. Wang et M.J. Caillier (1989). Fertility Grouping of Montréal Lowlands Soil Mapping Units Based on Selected Soil Characteristics of the Plow Layer. *Can. J. Soil Sci*. 69: 525-541.
- Novais, R. et E.J. Kamprath (1978). Phosphorus Supplying Capacities of Previously Heavily fertilized Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J* 42: 931-935.

- Novotny, V et G Chesters (1981). *Handbook of Nonpoint Source Pollution, Sources and Management*. New York, Van Nostrand Reinhold. pp.1-24.
- Pesant, A. (1990). Ruissellement et érosion des surfaces cultivées. Dans: *Colloque sur la conservation de l'eau en milieu agricole*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.), pp. 89-96. Québec, 12-13 février. Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Piché, I. et G. Gangbazo (1992). Incidence des tas de fumier sur les eaux de surface et les organismes benthiques. Dans: *Symposium sur la recherche et le développement en gestion environnementale des effluents d'élevage au Québec*, pp. ? Québec: Ministère de l'Environnement du Québec.
- Pierzynski, G.M. et T.J. Logan (1993). Crop, Soil, and Management Effects on Phosphorus Soil Test Level. *J. Prod. Agric.* 6 (4): 513-520.
- Pionke, H.B. et H.M. Kunishi (1992). Phosphorus status and content of suspended sediment in a pennsylvania watershed. *Soil Sci.* 153 (6): 452-462.
- Prato, T. et H. Shi (1990). A Comparison of Erosion and Water Pollution Control Strategies for an Agricultural Watershed. *Water Resour. Res.* 26 (2): 199-205. 34.
- Primeau, S. (1993). Notions générales sur la pollution de l'eau au Québec. *Colloque sur la gestion de l'eau "L'eau de demain, quel héritage laisserons-nous?"*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.), pp.21-28. Ste-Hyacinthe, 20-21 avril. Québec:Ministère de l'Alimentation, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Rémy, C. (1990). L'intelligence artificielle: nature, langages, outils. *Micro-systèmes.* 147-152.
- Riquier, J., D.L. Bramaio et J.P. Cornet (1970). *A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity*. Rome, FAO.
- Robert, L. (1992). Caractérisation et variabilité des engrais de ferme. *Colloque sur la gestion des fumiers*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.), pp. 203. Drummonville, 20-21 octobre. Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Robert, P.C., R.H. Rust et W.E. Larson (éds) (1992). *Soil Specific Crop Management, A Workshop on Research and Development Issues*, pp. 248-249. Sheraton Airport Inn, Minneapolis, April 14-16, 1992. Madison, Wisconsin, U.S.A.: American Society of Agronomy.
- Ross, G.J. et C. Wang (1993). Extractable Al,Fe,Mn,and Si. Dans: *Soil Sampling and Methods of Analysis*, M.R. Carter (éd.), pp. 239-240. Canadian Society of Soil Sciences, Agriculture Canada. Ontario: Lewis Publisher.
- Rossiter, D.G. et A.R. Van Wambeke (1993). *ALES, Automated Land Evaluation System, ver 1.0*. Ithaca, New York, Cornell University, 152 p.

- Sharpley, A.N., T.C. Daniel et D.R. Edwards (1993). Phosphorus Movement in the Landscape. *J. Prod. Agric.* 6 (4): 492-500.
- Schoumans, O.F., B.A. Marsman et A. Breeuwsma (1989). Assessment of Representative Soil Data for Phosphate Leaching. Dans: *Land Qualities in Space and Time*, J. Bouma et A.K. Bregt (éds), Wageningen, 22-26 août 1988. Pays-Bas: Pudoc Wageningen. 352 p.
- Simard, R.R. (1992). Interdépendance des fumures minérales et organiques. Dans: *Colloque sur la gestion des fumiers*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.), pp. 249. Drummonville, 20-21 octobre. Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Simard, R.R., D. Cluis, G. Gangbazo (1993). Animal unit density and P loads in soils of the Beaurivage watershed. *Can. J. Soil Sci.* 73(4): 653
- Simard, R.R. et A. N'dayegamiye (1993). Nitrogen-mineralization Potential of Meadow Soils. *Can. J. Soil Sci.* 73: 27-38.
- Simard, R.R. et C. Lapierre (1990). Les propriétés des sols importantes pour la rétention des agents polluants. Dans: *Colloque sur la conservation de l'eau en milieu agricole*, Conseil des productions végétales du Québec, pp. 169-176. Québec, 12-13 février. Québec: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Simoneau (1993). Qualité des eaux du bassin de la rivière des Hurons de 1979 à 1991. *Colloque sur la gestion de l'eau "L'eau de demain, quel héritage laisserons-nous?"*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.), (ajout). St-Hyacinthe, 20-21 avril. Québec: Ministère de l'Alimentation, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Sims, J.T. (1993). Environmental Soil Testing for Phosphorus. *J. Prod. Agric.* 6 (4): 501-507.
- Smit, B., M. Brklacich, J. Dumanski, K.B. MacDonald et M.H. Miller (1984). Integral Land Evaluation and its Application to Policy. *Can. J. Soil Sci.* 64 (4): 467-479.
- Statbec (1989). *Étude sur la gestion des surplus de lisier -Version Préliminaire*. Rapport présenté au Ministère de l'Environnement du Québec. 32 p.
- Tabi, M. et al. (1990). *Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec, Région 6, Richelieu, St-Hyacinthe*, Québec, Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, p.23.
- Tang, H., E. Van Ranst et C. Sys (1992). An Approach to Predict Land Production Potential for Irrigated and Rainfed Winter Wheat in Pinan County, China. *Soil Technol.* 5: 213-224.
- Taylor, C.R. (1975). A Regional Market for Rights to Use Fertilizer as a Means of Achieving Water Quality Standards. *J. Environ. Econ. Manage.* 2: 7-17.

- Thornley, S. et A.W. Bos (1985). Effects of Livestock Wastes and Agricultural Drainage on Water quality. *J. Soil Water Conserv.* 40 (1): 173-175.
- Tisdale, S.L. et W.L. Nelson (1975). *Soil Fertility and Fertilizers*. New York, MacMillan Publ.Co., 694 p.
- Tran, T.S. (1990). Relation entre les propriétés du sol et la disponibilité du phosphore à la plante. *Agrosol.* 3 (1): 7-12.
- Tran, T. S. (1988). Acidification des sols du Québec. *Agrosol.* 1 (1): 31-34.
- Tran, T.S., M. Giroux et A. Ndayegamiye (1992). Utilisation rationnelle des fumures azotées minérales: aspects agronomiques et environnementaux. *Agrosol.* 5 (2): 18-25.
- Tran, T.S. et R.R. Simard (1992). Comparaison entre les méthodes de résine échangeuses d'ions et les méthodes chimiques usuelles pour déterminer la disponibilité du phosphore des sols. *Agrosol.* 5 (1): 44-49.
- Tran, T. S. et al. (1988). Effects of soil properties on plant available phosphorus. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 52: 1383-1390.
- Tran, T.S. et M. Giroux (1985). Comparaison de différentes méthodes d'extraction du P assimilable en relation avec les propriétés chimiques et physiques des sols du Québec. *Can. J. Soil Sci.* 65: 35-46.
- Truman, C.C. et al. (1993). Seasonal Phosphorus Losses in Runoff from a Coastal Plain Soil. *J. Prod. Agric.* 6 (4): 507-513.
- Vallée, P. (1989). La valorisation des déjections animales. *Conférence pour la corporation des agronomes de la région des cantons de l'Est*, 15 février. Ministère de l'Environnement du Québec.
- van Lanen, H.A.J., Hack-ten Broeke, J. Bouma et W.J.M. de Groot (1992). A mixed qualitative/quantitative physical land evaluation methodology. *Geoderma.* 55: 37-54.
- van Lanen, H.A.J. et F.A. Wopereis (1992). Computer-captured expert knowledge to evaluate possibilities for injection of slurry from animal manure in the Netherlands. *Geoderma.* 54: 107-124. 61.
- van der Zee, S.E.A.T.H. et van Riemsdijk (1986). Sorption Kinetics and Transport of Phosphate in Sandy Soil. *Geoderma.* 38:293-309
- Vink, A.P.A. (1975). *Land Use in Advancing Agriculture*. New York, Springer-Verlag, 394 p.
- Wang, C. et D.R. Coote (1981). *Classes de sensibilité des terres agricoles à l'action prolongées des précipitations acides dans l'est du Canada*, Communication no. 98. Ottawa, Agriculture Canada.

- Western, S. (1978). *Soil Survey Contracts and Quality Control*. Oxford, Clarendon Press, pp.1-7.
- Wu, P., J.B.Braden et G.V. Johnson (1989). Efficient Control of Cropland Sediment: Storm Event Versus Annual Average Loads. *Water Resour. Res.* 25 (2): 161-168.
- Yergeau, M. (1988). *Loi sur la qualité de l'environnement, texte annoté*. Québec, Société québécoise d'information juridique, 1109 p.
- Yin, Y. et J.T. Pierce (1993). Integrated Resource Assessment and Sustainable Land Use. *Environ. Manage.* 17 (3):
- Ziegler, D. et M. Hédit (1991). *Engrais de ferme, valeur fertilisante, gestion, environnement*. Paris, ITP, ITCF et ITEB.

## **ANNEXES**



## Annexe 1. Facteurs pédologiques limitants définis selon trois degrés de sévérité du système ITC modifié<sup>47</sup>

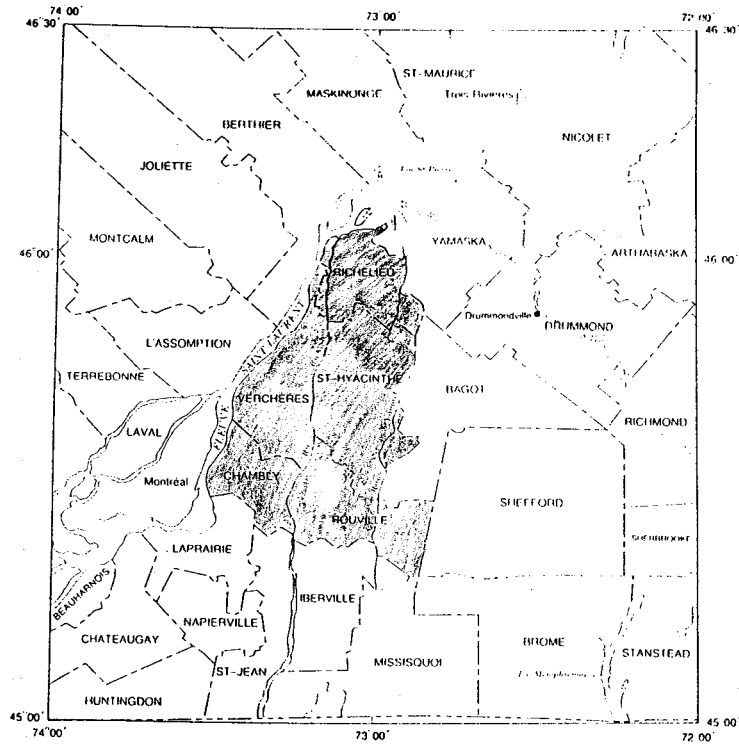
MAJEUR	MODÉRÉ	MINEUR												
<p>T': Pentas (&lt; 100 m) plus abruptes que 15 % affectant la capacité de travail de la machinerie et nécessitant des mesures de protection contre l'érosion hydrique.</p> <table style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>Pentes</td> <td>Points</td> </tr> <tr> <td>15-25 %</td> <td>(-2)</td> </tr> <tr> <td>25-50 %</td> <td>(-3)</td> </tr> <tr> <td>50-75 %</td> <td>(-4)</td> </tr> <tr> <td>75-100 %</td> <td>(-5)</td> </tr> <tr> <td>&gt;100 %</td> <td>(-6)</td> </tr> </table>	Pentes	Points	15-25 %	(-2)	25-50 %	(-3)	50-75 %	(-4)	75-100 %	(-5)	>100 %	(-6)	<p>T: Pentas de 10 à 15 % interférant légèrement avec l'utilisation de la machinerie agricole et nécessitant quelques pratiques spéciales anti-érosives.</p>	<p>t: Pentas de 6 à 9 % n'interférant pas avec l'utilisation de la machinerie agricole mais causant une érosion hydrique légère et/ou un manque d'uniformité dans la distribution de l'humidité, la germination de la semence et la croissance des plantes. Lorsqu'utilisé entre parenthèses (t), les pentas ne sont pas considérées dans le classement.</p>
Pentes	Points													
15-25 %	(-2)													
25-50 %	(-3)													
50-75 %	(-4)													
75-100 %	(-5)													
>100 %	(-6)													
<p>V': Variations répétitives dans le drainage de deux ou plusieurs classes de drainage à l'intérieur d'un cycle de moins de 50 m et ayant une amplitude de 1 m et plus. Le drainage varie généralement de rapide au sommet des ondulations à pauvre dans les dépressions. Dans les sols sableux, l'érosion éolienne est quelquefois un problème au sommet de l'ondulation.</p>	<p>V: Variations répétitives dans le drainage d'une classe de drainage à l'intérieur d'un cycle de plus de 50 m et ayant une amplitude de moins de 1 m du sommet de l'ondulation au creux de la dépression. Le drainage varie généralement de bas à imparfait.</p>	<p>v: Toute variation (répétitive ou non) du drainage à l'intérieur de très courtes distances (&lt; 100 m) résultant en un manque d'uniformité visible de la culture. Utilisé avec W', W et w ou M', M et m comme modificateur pour indiquer des variations de drainage à l'intérieur des unités cartographiques.</p>												
<p>W': Humidité excessive ou drainage très pauvre généralement causé par la formation d'étang, au suintement ou à un sous-sol imperméable. L'humidité excessive peut atteindre la surface et persister suffisamment pour asphyxier les plantes. Les plantes subissent fréquemment des dommages mortels causés par la formation de glace en surface durant la saison froide.</p>	<p>W: L'humidité ou le drainage mauvais à imparfait sur des terrains plats à légèrement ondulés. Se rencontre normalement sur des sols argileux ou sur des sols poreux reposant sur un substratum plat imperméable.</p>	<p>w: Humidité périodique ou drainage imparfait sur des terrains en pente. Se rencontre au milieu et en bas de pente des sols morainiques avoisinant les crêtes morainiques.</p>												
<b>FACTEURS PÉDOLOGIQUES LIMITANT LA CAPACITÉ DE PRODUCTION OU D'EXPLOITATION DES SOLS ORGANIQUES</b>														
<p>E': Épaisseur du matériau organique inférieure à 60 cm (Of) ou à 40 cm (Om ou Oh) sur un substratum minéral argileux amorphe ou sur un till compact.</p>	<p>E: Épaisseur du matériau organique inférieure à 60 cm (Of) ou à 40 cm (Om ou Oh) sur un substratum minéral sableux ou loameux friable ou entre 40 ou 60 et 120 cm sur un substratum minéral argileux amorphe ou sur un till compact.</p>	<p>e: Épaisseur du matériau organique allant de 60 à 120 cm (Of) ou de 40 à 120 cm (Om ou Oh) sur un substratum minéral sableux ou loameux friable ou entre 120 et 160 cm sur un substratum minéral argileux amorphe ou sur un till compact.</p>												
<p>L': Matériaux contenant plus de 50 % de fragments de bois (&gt;10 cm) ou de linaigrette dans les 80 premiers centimètres de la zone de contrôle.</p>	<p>L: Matériaux contenant entre 25 et 50 % de fragments de bois ou de linaigrette dans les 80 premiers centimètres de la zone de contrôle ou plus de 50 % au-dessous des 80 premiers centimètres de la zone de contrôle.</p>	<p>l: Matériaux contenant entre 10 et 25 % de fragments de bois (&gt;10 cm) ou de linaigrette dans les 80 premiers centimètres de la zone de contrôle ou entre 25 et 50 % au-dessous des 80 premiers centimètres de la zone de contrôle.</p>												

<sup>47</sup> Adapté de Marshall et al. (1979), Martin et Nolin, *Étude pédologique du comté de Chambly, 1991*, pp.237-238



MAJEUR	MODÉRÉ	MINEUR
<p>D': Sol massif, faible structure et/ou consistance ferme à très ferme dans la couche de labour et dans le sous-sol causant une aération insuffisante, une absorption et une distribution lente de l'humidité. Le sol de surface est difficile à cultiver, la préparation du lit de semence requiert des travaux spéciaux et en conditions humides, la capacité portante du sol est faible.</p>	<p>D: Sol massif, faible structure, et/ou consistance ferme causant une aération et une faible pénétration des racines, principalement dans le sous-sol.</p>	<p>d: Mauvaise structure causant des problèmes mineurs d'aération et de perméabilité de l'eau.</p>
<p>F': Bilan nutritif et capacité d'échange cationique très faible causés par une très faible quantité de matière organique et/ou par un faible contenu en argile; déséquilibre nutritif très sévère résultant de la forte acidité (pH &lt;4,5) ou alcalinité (pH &gt;7,6) dans la couche de labour.</p>	<p>F: Taux de matière organique faible et/ou faible contenu en argile induisant un bilan nutritif faible et/ou un déséquilibre nutritif modéré; acidité (4,5 à 5,5) ou alcalinité (7,4 - 7,6) de la couche de labour restreignant la croissance de certaines plantes.</p>	<p>f: Déséquilibre nutritif mineur, manque de matière organique et réaction (pH) légèrement acide (5,5 - 5,8) ou alcaline (6,8 - 7,4) affectant seulement quelques plantes. Besoin en chaux modéré.</p>
<p>I': Inondation fréquente de durée prolongée (&gt;5 jours) durant la saison de végétation; les inondations causées par les débordements printaniers dans la plaine d'inondation ne sont pas considérées ici.</p>	<p>I: Inondation occasionnelle de courte durée (&lt;5 jours) ce qui élève la nappe phréatique pour une longue durée (&gt;5 jours).</p>	<p>i: Inondation occasionnelle, très brève (1 jour) et nappe phréatique très élevée et affectant seulement les plantes à racines profondes comme la luzerne. Souvent utilisé avec W' pour indiquer la possibilité d'inondation locale.</p>
<p>M': Manque d'humidité dans les sols sableux à graveleux bien à excessivement drainés exigeant de l'irrigation pour la production normale de culture sous des conditions de température moyenne. De tels sols sont exposés à l'érosion éolienne lorsque non irrigués et non protégés par de la végétation, des brise-vents ou une culture en bande.</p>	<p>M: Manque d'humidité dans les sols bien à excessivement drainés, constitués de sable loameux et de loam sableux grossier, de même que dans les sols constitués de loam sableux fin et loam sous-jacent à un matériel sableux ou graveleux. Sans irrigation, les rendements des cultures peuvent être économiquement acceptables en saison normale à humide, mais non en saison sèche.</p>	<p>m: Manque d'humidité dans les sols bien drainés constitués de loam sableux fin ou loam, spécialement ceux ayant un substratum de texture fine. De bonnes pratiques de conservation de l'humidité du sol permettent des rendements acceptables sous des conditions climatiques moyennes.</p>
<p>P': Sols suffisamment pierrenx pour augmenter suffisamment les difficultés de travail du sol, de semis et de récolte.  Pierrosité 3 Points (-2)  Pierrosité 4 Points (-3 à -4)  Pierrosité 5 Points (-5 à -6)</p>	<p>P: Sols de pierrosité 2 (0,1 à 3 % de la surface) causant une nuisance mineure aux opérations de préparation du sol, de semis et de récolte.</p>	<p>p: Sols de pierrosité 1 (0,1 % de la surface). Ceci s'applique principalement aux sols pierrenx sur lesquels des travaux d'épierrement ont été réalisés mais dont l'enlèvement des pierres doit être continué occasionnellement.</p>
<p>R': Le roc consolidé et dur se trouve à moins de 0,5 m avec des affleurements couvrant  10-20 % de la surface Points (-2)  21-50 % de la surface Points (-3)  51-75 % de la surface Points (-4)  76-90 % de la surface Points (-5)  &gt;90 % de la surface Points (-6)</p>	<p>R: Le roc consolidé et dur se trouve entre 0,5 m et 1,0 m, avec des affleurements couvrant moins de 10 % de la surface, ou le roc tendre et faiblement consolidé (schiste argileux et métamorphique) se trouve entre 30 cm et 1 m avec des affleurements couvrant moins de 20 % de la surface.</p>	<p>r: Le roc consolidé et dur se trouve à plus de 1,0 m, ou le roc non consolidé et tendre (schiste argileux et métamorphique) se trouve entre 50 cm et 1 m affectant la distribution de l'humidité, la pierrosité, etc.</p>

## Annexe 2. Position géographique de la région à l'étude dans le Québec méridional



Tiré de Martin et Nolin (1991) Étude pédologique du comté de Chambly

### Annexe 3. Caractéristiques de sol des unités cartographiques retenues

#### Caractéristiques générales des séries de sols

Série de sol	Unité carto.	Type d'horizon	Matériau (25-75 cm)	Matériau (75-125 cm)	Pente en 5 classes	Pente en 7 classes	Pierrosité	Profondeur au roc	Roccosité	Famille calcaire
Achigan	AC1	podzol humique ortique	sableux (>70%)	sableux (>70%)	A (0-3%)	0-0.5%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	non calcaire
St-Aimé	AI3	gleysol	loameux	loameux	A (0-3%)	0-0.5%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	faiblement calcaire
Boucherville	BC4n	gleysol	till		A (0-3%)	0.5-2%	non pierreux	très mince (20-50 cm)	non rocheux	fortement calcaire
Cousineau	CO	O	organique	argileux (>40%)	A (0-3%)	0-0.5%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	non calcaire
St-Damase	DA2	brunisol dyst./sombrique	sableux (>70%)	argileux (>40%)	A (0-3%)	0.5-2%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	non calcaire
Du Mont	DU3jncqr	Podzol ferro-humique	graveleux (>20%)		C (8-15%)	9 à 15%	très pierreux	très mince (20-50 cm)	légèrement rocheux	non calcaire
St-Hyacinthe	HY3	gleysol	loameux	loameux	A (0-3%)	0.5-2%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	non calcaire
Ste-Julie	J13	brunisol eutr./mélanique	till	till	A (0-3%)	0.5-2%	non pierreux	mince(50-100 cm)	non rocheux	non calcaire
Joseph	JS2	gleysol	sableux (>70%)	sableux (>70%)	A (0-3%)	0.5-2%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	non calcaire
Pierreville	PI3	gleysol "ferrique"	loameux	sableux (>70%)	A (0-3%)	0.5-2%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	non calcaire
Providence	PV5	gleysol	argileux (>40%)	argileux (>40%)	A (0-3%)	0.5-2%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	non calcaire
Ste-Rose	RS2	gleysol	loameux	loameux	A (0-3%)	0.5-2%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	non calcaire
St-Thomas	TH1B	podzol humo-ferrique	sableux (>70%)	sableux (>70%)	B (3-8%)	5-9%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	non calcaire
St-Urbain	UB4	gleysol	argileux (>40%)	argileux (>40%)	A (0-3%)	0-0.5%	non pierreux	profond (>100 cm)	non rocheux	faiblement calcaire

## Caractéristiques texturales et chimiques de la couche de surface

Unité carto.	Texture	Classe texturale	Fraction sableuse	% Matière organique	Qualificatif textural	Degré de la structure	Calcium éch.	CEC	Potassium éch.	Phosphore ass.	pH-eau
AC1	SFL	1	fin	modéré	aucun	particulaire	très faible	faible	faible	faible	5.5-6.0
AI3	L	3	fin	modéré	aucun	assez structuré	faible	modéré	faible	faible	6.0-6.5
BC4n	LA	4		modéré	aucun	assez structuré	modéré	modéré	faible	faible	6.0-6.5
CO	O	O		ext. élevé	aucun	peu structuré	très élevé	très élevé	très faible	très élevé	0-4.6
DA2	LSF	2	fin	modéré	aucun	peu structuré	faible	faible	modéré	faible	5.5-6.0
DU3jncqr	LLi,mince	3		modéré	aucun	assez structuré	faible	très élevé	faible	faible	5.0-5.5
HY3	LLi	3		faible	aucun	peu structuré	faible	modéré	modéré	très faible	6.0-6.5
JI3	L	3		modéré	aucun	assez structuré	faible	modéré	modéré	très faible	4.6-5.0
JS2	LSF	2	fin	modéré	aucun	massif ou amorphe	faible	modéré	faible	faible	5.5-6.0
PI3	LS	3	fin	modéré	aucun	peu structuré	faible	modéré	faible	très faible	5.5-6.0
PV5	ALi	5		modéré	aucun	peu structuré	modéré	élevé	élevé	faible	6.0-6.5
RS2	LSF	2	fin	modéré	aucun	peu structuré	faible	modéré	très faible	très faible	6.0-6.5
TH1B	SF	1	fin	modéré	aucun	massif ou amorphe	faible	faible	faible	modéré	5.5-6.0
UB4	LLiA	4		modéré	aucun	très structuré	élevé	modéré	très élevé	modéré	6.5-7.3

### Limites de classe:

Classes:	Teneur en calcium	CEC	Teneur en K éch.	Teneur en P ass. (Bray-2)	Teneur en m.o. <sup>a</sup>	Classe texturale
très faible	<2.5 cmol/kg	<6 cmol/kg	<0.13 cmol/kg	<45 mg/kg	faible (<1.7%)	1: SG,S,SF,STF,SLG,SL,SLF
faible	2.5-8.5 cmol/kg	6-12 cmol/kg	0.13-0.25 cmol/kg	45-90 mg/kg	modéré (1.7-4%)	2: SLTF,LSG,LS,LSF
modéré	8.5-14.5 cmol/kg	12-25 cmol/kg	0.25-0.44 cmol/kg	90-135 mg/kg	élevé (4-9%)	3: LSTF,L,LLi
élevé	14.5-20.5 cmol/kg	25-40 cmol/kg	0.44-0.57 cmol/kg	135-180 mg/kg	très élevé (9-17%)	4: LSA,LA,LLiA
très élevé	>20.5 cmol/kg	>25 cmol/kg	>0.57 cmol/kg	>180 mg/kg	extrêmement élevé (>17%)	5: AS,A,ALi
						6: ALo
						7: O

<sup>a</sup> matière organique

### Caractéristiques texturales et chimiques de l'horizon B

Unité carto.	Texture	Classe texturale	% Matière organique	Qualificatif textural	Degré de la structure	Calcium éch.	CEC	Potassium éch.	Phosphore ass.	pH-eau
AC1	S	1	modéré (1-5%)	aucun	massif ou amorphe	faible	modéré	très faible	faible	5.5-6.0
AI3	L	3	très faible	aucun	massif ou amorphe	faible	modéré	faible	modéré	6.5-7.3
BC4n	LA	4	très faible	graveleux	massif ou amorphe	modéré	faible	faible	faible	7.3-7.8
CO	O	O	ext. élevé	aucun	peu structuré	n/d	n/d	n/d	n/d	5.0-5.0
DA2	S	1	très faible	aucun	particulaire	très faible	très faible	faible	faible	6.0-6.5
DU3jncqr	LLi	3	élevé	très caillouteux	massif ou amorphe	très faible	élevé	faible	très faible	5.0-5.5
HY3	LLiA	3	très faible	aucun	massif ou amorphe	modéré	modéré	faible	modéré	6.5-7.3
Ji3	L	3	faible	graveleux	peu structuré	faible	modéré	faible	très faible	5.0-5.5
JS2	S	1	très faible	aucun	massif ou amorphe	très faible	très faible	très faible	faible	6.0-6.5
PI3	SL	1	très faible	aucun	particulaire	très faible	très faible	très faible	très faible	6.0-6.5
PV5	A	5	très faible	aucun	peu structuré	modéré	élevé	élevé	faible	6.5-7.3
RS2	LS	2	très faible	aucun	massif ou amorphe	faible	faible	très faible	modéré	6.0-6.5
TH1B	S	1	faible	aucun	massif ou amorphe	très faible	très faible	très faible	modéré	5.5-6.0
UB4	ALi	5	très faible	aucun	très structuré	élevé	modéré	élevé	modéré	7.3-7.8

### Caractéristiques texturales et chimiques de l'horizon C

Unité carto.	Texture	Classe texturale	% Matière organique	Qualificatif textural	Degré de la structure	Calcium éch.	CEC	Potassium éch.	Phosphore ass.	pH-eau
AC1	S	1	très faible (<0.5%)	aucun	massif ou amorphe	très faible	très faible	très faible	faible	5.5-6.0
AI3	L	3	très faible	aucun	massif ou amorphe	élevé	faible	modéré	faible	7.8-8.4
BC4n	LA	4								
CO	O	O	très faible	aucun	massif	n/d	n/d	n/d	n/d	7.3-7.8
DA2	ALo	6	très faible	aucun	massif	modéré	modéré	très élevé	faible	6.5-7.3
DU3jncqr	n/a									
HY3	LLiA	3	très faible	aucun	massif ou amorphe	faible	modéré	modéré	faible	6.5-7.3
JI3	LA	4	n/d	graveleux	peu structuré	faible	modéré	faible	très faible	5.5-6.0
JS2	S	1	très faible	aucun	massif ou amorphe	faible	faible	très faible	faible	6.5-7.3
PI3	SL	1	très faible	aucun	massif ou amorphe	très faible	très faible	très faible	faible	6.5-7.3
PV5	ALo	6	très faible	aucun	massif ou amorphe	modéré	élevé	très élevé	élevé	7.3-7.8
RS2	LS	2	très faible	aucun	massif ou amorphe	faible	faible	très faible	modéré	6.5-7.3
TH1B	S	1	très faible	aucun	massif ou amorphe	très faible	très faible	très faible	faible	5.5-6.0
UB4	ALo	6	très faible	aucun	massif	très élevé	modéré	très élevé	très faible	7.8-8.4

### Caractéristiques affectant le régime hydrique

Unité carto.	Drainage	Profondeur au gley	Risque d'inondation	Perméabilité du A	Perméabilité du B	Perméabilité du C	Réserve en eau utile sur 100 cm (cm) <sup>a</sup>	Ruissellement
AC1	mauvais	25-50 cm	absent	rapide	lente à modérée	rapide	8,5 (mb)	nul
AI3	mauvais	0-25 cm	absent	modérée	modérée	modérée	24 (te)	lent
BC4n	mauvais	25-50 cm	absent	lente	lente		9,7 (mb)	modéré
CO	très mauvais		absent	lente	lente	lente à modérée	19 (e)	modérée
DA2	mauvais	0-25 cm	absent	rapide	rapide	lente à modérée	12,4 (m)	nul
DU3jncqr	bien	>100 cm	absent	modérée à rapide	modérée à rapide		3,25 (tb)	rapide
HY3	mauvais	25-50 cm	absent	modérée	modérée	modérée	25,5 (te)	lent
JI3	imparfait	25-50 cm	absent	modérée	lente à modérée	lente à modérée	13 (m)	lent
JS2	mauvais	0-25 cm	absent	rapide	rapide	rapide	9 (mb)	nul
PI3	mauvais	25-50 cm	présent	modérée à rapide	modérée à rapide	modérée à rapide	9,5 9 (mb)	très lent
PV5	mauvais	0-25 cm	absent	modérée à rapide	lente à modérée	lente à modérée	23,5 (te)	très lent
RS2	mauvais	25-50 cm	absent	modérée	modérée	modérée	21 (te)	lent
TH1B	bien	75-100 cm	absent	rapide	rapide	rapide	9 (mb)	très lent
UB4	mauvais	25-50 cm	absent	rapide	rapide	rapide	24 (te)	nul

<sup>a</sup>Les données utilisées proviennent par ordre de priorité des rapports pédologiques de Chambly, Richelieu et de St-Hyacinthe (vol.1, chap.5). La réserve en eau utile sur 100 cm est fournie en cm/cm par couche de 25 cm. La classification a été obtenue en cumulant les données par épaisseur [ $\Sigma$  (moyenne de la couche cm/cm \* 25 cm)].

Les classes sont : extrêmement basse, xb (>2.5 cm), très basse, tb (2,5-5,0 cm), basse, b (5,0-7,5 cm), basse à modérée, mb (7,5-10 cm), modérée, m (10-15 cm), élevée, e (15-20 cm) et très élevée, te (>20 cm).

## Classification des séries de sols<sup>a</sup>

Aptitude ou qualité de sol	Classes	Cousineau	St-Damase	St-Hyacinthe	Joseph	Providence	St-Thomas	St-Urbain
1. Possibilité de cultiver du maïs	Apte	0/4	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4
	inapte	4/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4
2. Condition de mécanisation:	aucune limitation	0/3	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4
	limitante	0/3	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4
	très limitante	3/3	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4
3. Longuer de la saison de croissance:	hâtive	0/2	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
	moyenne	0/2	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4
	tardive	1/2	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
	très tardive	1/2	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4
4. Disponibilité en eau:	adéquate	2/2	2/5	5/5	2/5	5/5	0/5	5/5
	limitante	0/2	3/5	0/5	3/5	0/5	2/5	0/5
	très limitante	0/2	0/5	0/5	0/5	0/5	3/5	0/5
5. Productivité potentielle (estimation des rendements)	très faible (< 5 t/ha)	2/2	0/4	0/4	0/4	0/4	2/4	0/4
	faible (5-6,5 t/ha)		0/4	0/4	1/4	0/4	2/4	0/4
	modéré (6.6-7.9 t/ha)		2/4	0/4	2/4	0/4	0/4	0/4
	élevé (8-8.9 t/ha)		1/4	0/4	1/4	2/4	0/4	1/4
	très élevé (>9t/ha)		1/4	4/4	0/4	2/4	0/4	3/4

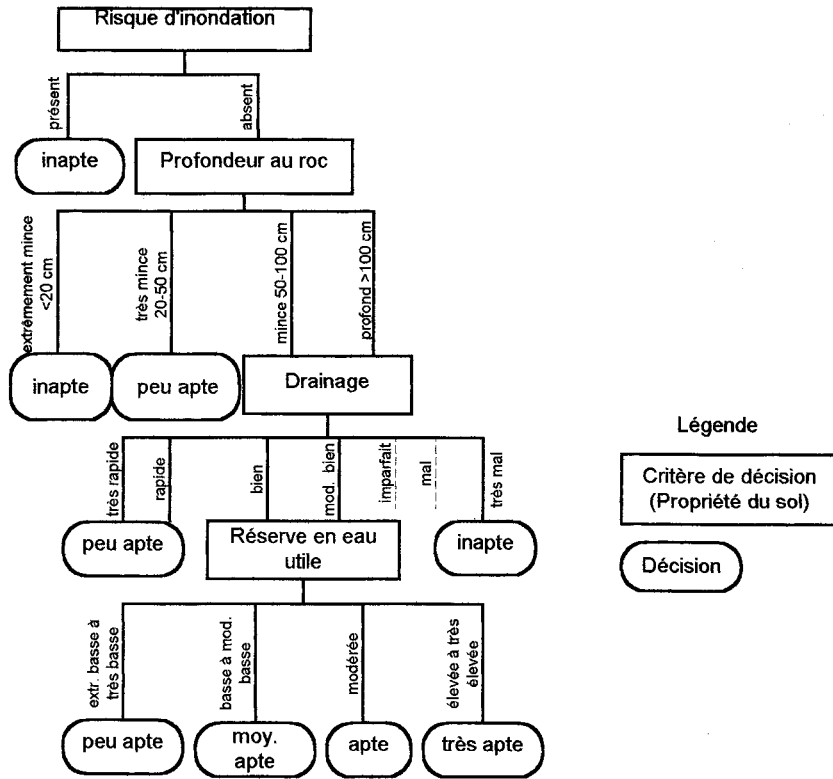
Aptitude ou qualité de sol	Séries de sols Classes <sup>a</sup> →	Cousineau			St-Damase			St-Hyacinthe			Joseph			Providence			St-Thomas			St-Urbain		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
6. Capacité de retenir les cations	Scénarios ↓	0/4	0/4	4/4	3/5	1/5	1/5	1/5	2/5	2/5	1/5	3/5	1/5	1/5	1/5	3/5	4/5	1/5	0/5	2/5	0/5	3/5
7. Pertes par volatilisation	printemps	0/5	2/5	3/5	1/5	1/5	3/5	1/5	3/5	1/5	1/5	2/5	2/5	1/4	2/4	1/4	1/5	2/5	2/5	1/5	2/5	2/5
	printemps enfoui	1/4	2/4	1/4	4/5	1/5	0/5	5/5			5/5			4/4			4/5	1/5	0/5	4/5	1/5	0/5
	été	1/3	0/3	2/3	1/5	3/5	1/5	2/5	3/5	0/5	2/5	3/5	0/5	2/4	2/4	0/4	2/5	3/5	0/5	2/5	2/5	1/5
	automne	0/4	1/4	3/4	2/5	3/5	0/5	3/5	2/5	0/5	3/5	2/5	0/5	2/5	3/5	0/5	3/5	2/5	0/5	2/5	3/5	0/5
8. Capacité du sol à retenir P	n/a	2/4	0/4	2/4	1/4	2/4	1/4	0/4	3/4	1/4	0/4	2/4	2/4	0/4	3/4	1/4	1/4	1/4	2/4	0/4	3/4	1/4
9. Indice d'érodabilité	n/a	2/4	0/4	2/4	1/4	2/4	1/4	1/4	3/4	0/4	2/4	2/4	0/4	2/4	2/4	0/4	0/3	2/3	1/3	3/4	1/4	0/4
10. Pertes par ruissellement	printemps	1/4	2/4	1/4	2/5	2/5	1/5	1/5	4/5	0/5	2/5	3/5	0/5	1/5	3/5	1/5	1/5	2/5	2/5	1/5	3/5	1/5
	printemps enfoui	4/4			5/5			5/5			5/5			5/5			5/5			5/5		
	été	2/4	1/4	1/4	3/4	0/4	1/4	3/4	1/4	0/4	4/4			2/3			2/3	0/3	1/3	3/4	0/4	1/4
	automne	2/4	2/4	0/4	2/5	3/5	0/5	3/5	2/5	0/5	3/5	2/5	0/5	3/5	2/5	0/5	2/5	1/5	2/5	3/5	2/5	0/5
11. Capacité de rétention du profil	n/a	0/4	0/4	4/4	3/5	1/5	1/5	1/5	2/5	2/5	3/5	0/5	2/5	1/5	1/5	3/5	3/5	1/5	1/5	1/5	0/5	4/5
12. Pertes par lessivage	printemps	1/4	3/4	0/4	1/5	2/5	2/5	2/5	3/5	0/5	0/5	3/5	2/5	1/4	3/4	0/4	0/5	2/5	3/5	3/5	2/5	0/5
	printemps enfoui	2/4	2/4	0/4	1/5	2/5	2/5	2/5	3/5	0/5	1/5	2/5	2/5	1/4	3/4	0/4	1/5	1/5	3/5	4/5	1/5	0/5
	été	3/4	1/4	0/4	3/5	2/5	0/5	4/5	1/5	0/5	3/5	1/5	1/5	3/4	1/4	0/4	2/5	2/5	1/5	4/5	1/5	0/5
	automne	0/4	4/4	0/4	1/5	2/5	2/5	1/5	4/5	0/5	0/5	2/5	3/5	0/4	4/4	0/4	0/5	1/5	4/5	1/5	4/5	0/5

<sup>a</sup>Que sept experts ont rempli le questionnaire tel quel.

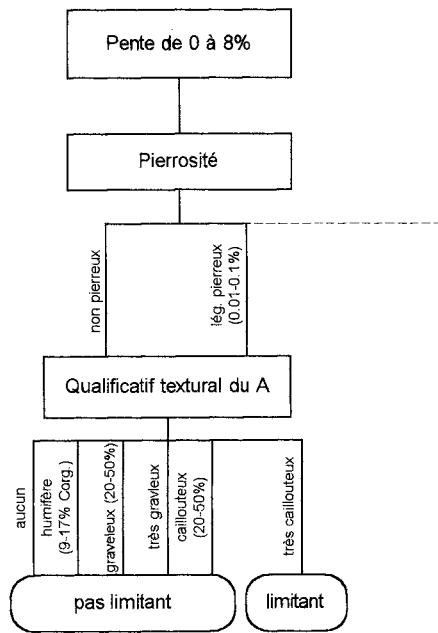
<sup>a</sup> Faible (1), modéré (2), élevé (3)



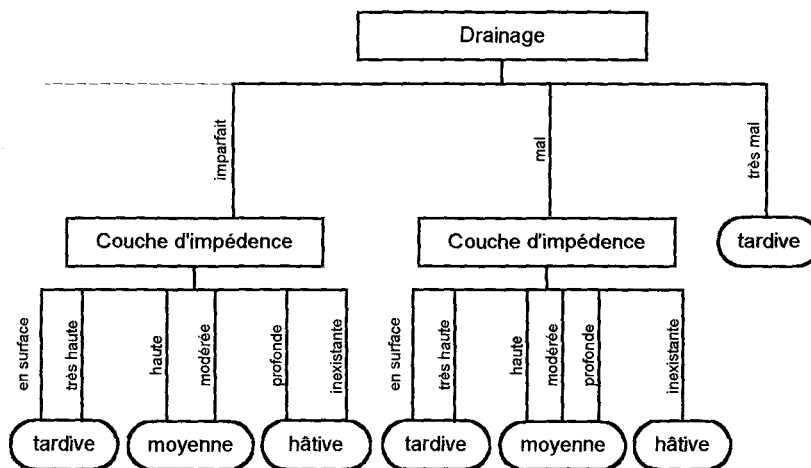
### Annexe 5. Aptitude à produire du maïs



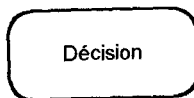
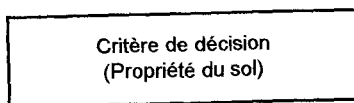
### Annexe 6. Conditions de mécanisation



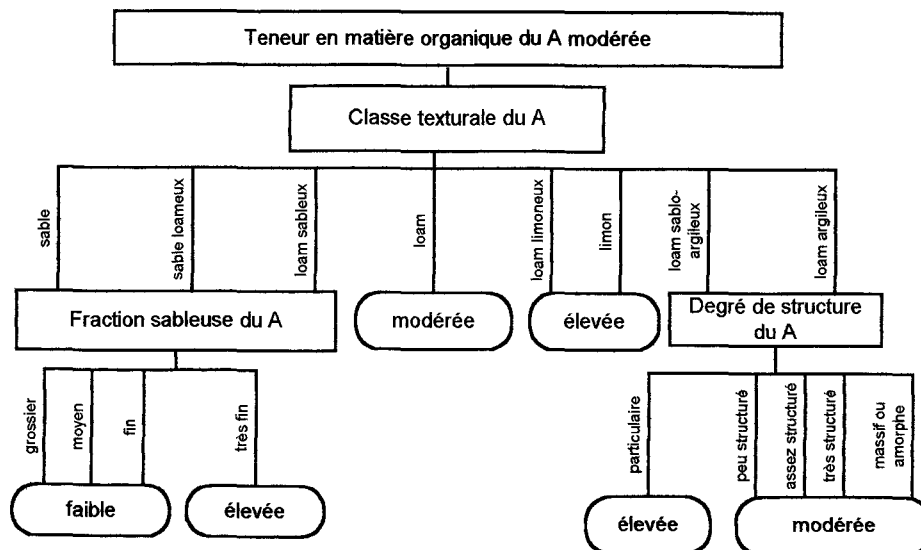
### Annexe 7. Conditions d'ensemencement



Légende



## Annexe 8. Évaluation de l'indice d'érodabilité et du ruissellement



### Indice d'érodabilité d'un sol avec 1.7 à 4% de matière organique

#### Estimation du ruissellement

Pente	Profondeur de la couche d'impédence				
	<30cm	30-50 cm	50-75 cm	75-100 cm	>100 cm
0-0.5%	très lent	nul	nul	nul	nul
0.5-2%	lent	lent	lent	très lent	très lent
2-5%	modéré	lent	lent	très lent	très lent
5-9%	très rapide	rapide	modéré	lent	lent
9-15%	très rapide	rapide	modéré	modéré	modéré
15-30%	très rapide	très rapide	très rapide	très rapide	très rapide
>30%	très rapide	très rapide	très rapide	très rapide	très rapide

Les définitions de classes s'inspirent de SISCAN (1982):

nul: en dépression

très lent: terrain plat, perméabilité rapide

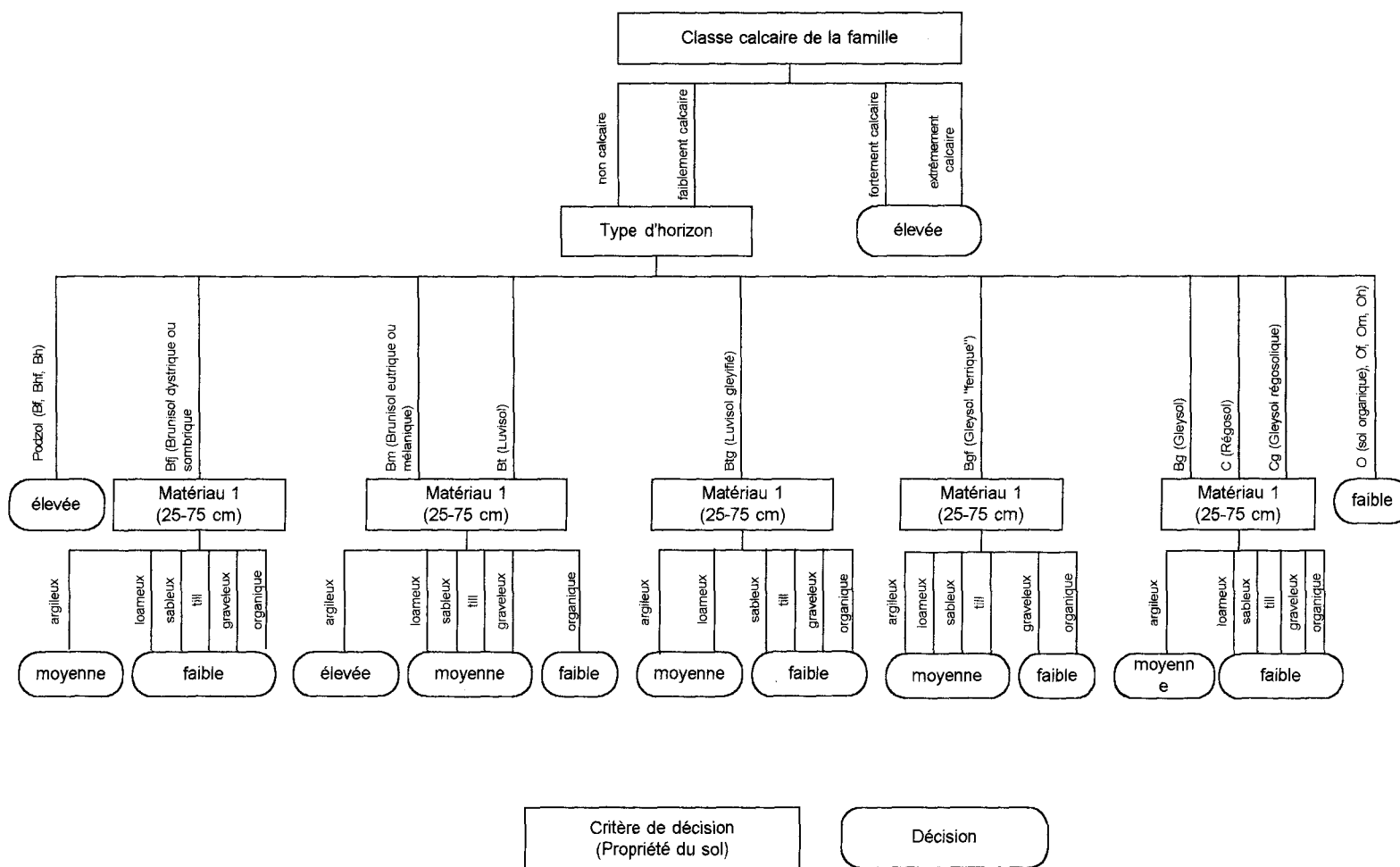
lent: 0.5 à 5% de pente, perméabilité rapide, érosion très faible à faible

modéré: écoulement modéré, perméabilité modérée, érosion faible à modéré

rapide: écoulement rapide à la surface, perméabilité faible, pente forte à assez forte, érosion modéré à élevée

très rapide: idem, pente forte à très forte, érosion élevée à très élevée

## Annexe 10. Capacité de rétention du phosphore



### Annexe 12. Caractéristiques affectant l'aptitude des sols à produire le maïs

Unité	DR	dr	dr_d	REU	re100	CEC,A.	cec A	CEC,B	cec B	CEC,C	cec C	cr_pro
AC1	mal	mal	mod. bien	mod. basse	mod. basse	f	f	m	m	tf	tf	f
AI3	mal	mal	mod. bien	très élevée	élevée	m	m	m	f	f	f	f
BC4n	mal	mal	mod. bien	mod. basse	mod. basse	m	m	f	f		n/a	f
CO	très mal	très mal	imparfait	élevée	très élevée	te	f	n/d	f	n/d	f	f
DA2	mal	mal	mod. bien	modérée	modérée	f	m	tf	f	m	f	f
DU3jncqr	bien	bien	bien	très basse	basse	te	m	e	e		n/a	m
HY3	mal	mal	mod. bien	très élevée	élevée	m	f	m	f	m	f	f
JI3m	imparfait	imparfait	bien	modérée	modérée	m	m	m	f	m	n/a	f
JS2	mal	mal	mod. bien	mod. basse	mod. basse	m	m	tf	f	f	f	f
PI3	mal	mal	mod. bien	mod. basse	élevée	m	m	tf	f	tf	f	f
PV5	mal	mal	mod. bien	très élevée	très élevée	e	e	e	e	e	e	e
RS2	mal	mal	mod. bien	très élevée	élevée	m	m	f	f	f	f	f
TH1b	<b>bien</b>	<b>mod. bien</b>	bien	mod. basse	mod. basse	f	f	tf	f	tf	tf	f
UB4	mal	mal	mod. bien	très élevée	très élevée	m	m	m	f	m	m	m

#### Légende:

DR: Classe de drainage provenant des rapports

dr: drainage déduit

dr\_d: drainage déduit si les sols sont drainés artificiellement

REU: réserve en eau utile sur 100 cm provenant des rapports pédologiques

re100: réserve en eau utile sur 100 cm de sol déduite

CEC,A: cec mesurée du A des rapports pédologiques

cec\_A: capacité d'échange cationique de la couche de surface déduite

CEC,B: cec mesurée du B des rapports pédologiques

cec\_B: cec de l'horizon B

CEC,C: cec mesurée du C des rapports pédologiques

cec\_C: cec de l'horizon C

cr\_pro: capacité de rétention des cations du profil déduit à partir des trois horizons

tf: très faible

f: faible

m: modéré

e: élevé

te: très élevé

mod. bien: modérément bien drainé

n/d: non disponible

n/a: non applicable

### Annexe 13. Qualités des terres affectant la productivité potentielle pour le maïs

	m	Facteur limitant	pl	pl_d	Facteur limitant	de	de_d	Facteur limitant
AC1	1		m	p	drainage	1	2	
AI3	1		m	p	drainage	1	1	
BC4n	1		t	t	couche d'impédence	1	2	
CO	1		t	t	drainage	1	1	
DA2	1		m	h	perméabilité	1	1	
DU3jncqr	3	pierrosité	h	h	couche d'impédence	2	2	épaisseur du sol
HY3	1		m	p	drainage	1	1	
JI3m	1		m	p	drainage	1	2	
JS2	1		m	p	drainage	1	2	
PI3	1		m	p	drainage	1	1	
PV5	1		m	h	perméabilité	1	1	
RS2	1		m	p	drainage	1	1	
TH1b	1=6,2=4	pente	p	p		2	2	texture
UB4	1		m	p	drainage	1	1	

#### Légende:

- m: conditions de mécanisation  
(1) aucune limitation, (2) limitante, (3) très limitante
- pl: conditions de plantation ou longueur de la saison de croissance
- pl\_d: pour les sols drainés artificiellement  
(p) précoce, (h) hâtive, (m) moyenne, (t) tardive.
- de: disponibilité en eau
- de\_d: pour les sols drainés artificiellement  
(1) adéquate, (2) limitante, (3) stress sévère

### Annexe 14. Prélèvements en NPK par le maïs et possibilités d'exportation

	Superficie (ha)	Maïs_d (t/ha)	N total <sup>a</sup> (kg/ha)	P total <sup>a</sup> (kg/ha)	K total <sup>a</sup> (kg/ha)	N export. <sup>b</sup> (kg/ha)	P export. <sup>b</sup> (kg/ha)	K export. <sup>b</sup> (kg/ha)
AC1	1653	6.8	189	31	121	132	22	36
AI3	1594	8	223	36	143	156	26	43
DA2	1516	7.2	200	33	128	140	23	39
HY3	5028	8	223	37	143	156	26	43
Jl3m	23	6.8	189	31	121	132	22	36
JS2	4312	6.8	189	31	121	132	22	36
PV5	2207	7.2	200	33	128	140	23	39
RS2	896	8	223	36	143	156	26	43
TH1b	348	6.8	189	31	121	132	22	36
UB4	13	8	223	36	143	156	26	43
<b>Total<sup>c</sup></b>	<b>17 590</b>	<b>121 660</b>	<b>3 385 344</b>	<b>553 755</b>	<b>2 168 736</b>	<b>2 367 096</b>	<b>393 414</b>	<b>651 282</b>

<sup>a</sup>Prélèvement total potentiel selon CPVQ (1990)

N total = Maïs\_d \* 27.9 kgN/t

P total = Maïs\_d \* 4.6 kgP/t

K total = Maïs\_d \* 17.9 kgK/t

Total régional = Σ(superficie<sub>i</sub> \* prélèvement<sub>i</sub>)

<sup>b</sup>Prélèvement par l'épi selon Giroux (1991)

N exportable = Maïs\_d \* 27.9 kgN/t \* 0.70

P exportable = Maïs\_d \* 4.6 kgP/t \* 0.70

K exportable = Maïs\_d \* 17.9 kgK/t \* 0.30

Total régional = Σ(superficie<sub>i</sub> \* prélèvement<sub>i</sub>)

<sup>c</sup>Rendements totaux = Σ(superficie<sub>i</sub> \* rendements<sub>i</sub>)

### Annexe 15. Classification selon les risques de volatilisation

Unités	ETA	ETA_dr	Pr	Pre	Été	Aut
AC1	3	1	3	1	2	1
AI3	3	1	3	1	2	1
BC4n	3	2	3	1	2	2
CO	3	1	3	2	2	1
DA2	3	1	3	1	1	1
DU3jncqr	3	1	3	1	2	1
HY3	3	1	3	1	2	1
Jl3m	3	1	3	1	2	1
JS2	3	1	3	1	1	1
PI3	3	1	3	1	2	1
PV5	3	2	3	1	1	2
RS2	3	1	3	1	2	1
TH1b	3	1	3	1	2	1
UB4	3	1	3	1	1	1

Légende: Classes : faible (1), modéré (2), élevé (3)

ETA: Épandage sur terres agricoles non drainés artificiellement

ETA\_dr: avec drainage

Pr: Épandage au printemps, lisier non enfoui

Pre: Épandage au printemps, lisier enfoui

Été: Épandage à l'été en post levé par rampe

Aut: Épandage à l'automne, lisier enfoui

### Annexe 17. Superficies estimées par classe de risques de lessivage

Classe de risques	sols non drainés <sup>a</sup>	sols drainés <sup>a</sup>	Printemps non enfoui <sup>b</sup>	Printemps enfoui <sup>b</sup>	Été <sup>b</sup>	Automne <sup>b</sup>
1	2 775	2 788	nil	nil	2 788	nil
2	13	7 600	2 788	2 788	15 429	2788
3	15 429	7 829	15 429	15 429	nil	15 429

<sup>a</sup>sans scénario d'épandage

<sup>b</sup>sur sols drainés

### Annexe 18. Capacité de rétention du phosphore

Unités	Al <sub>ox</sub> %	Capacité de rétention du P	Selon Tran et al. (1988)	Selon Giroux et Tran (1985) <sup>a</sup>	Débalancement en P <sup>b</sup>
AC1	0.21	élevée		faible	1
AI3	0.07	faible		faible	2
BC4n	0.13	modérée		faible	
CO		faible	faible		
DA2	0.15	faible		faible	2
DU3jncqr		élevée		modérée	
HY3	0.48	faible	faible à modérée	modérée	1
JL3m	0.59	modérée		modérée	1
JS2		faible			2
PI3	0.11	modérée		faible	
PV5	0.36	modérée		modérée	2
RS2	0.16	faible		faible	1
TH1b		élevée			3
UB4	0.21	modérée	modérée	faible	3

<sup>a</sup>Les classes de fixation du P sont faible (<0.3 % Al<sub>ox</sub>), modéré (0.3-0.6 % Al<sub>ox</sub>) et élevé (>0.6 % Al<sub>ox</sub>). Elles ont été établies à partir de données de la couche de surface (A). C

e qui démontre l'influence des horizons inférieurs sur cette couche malgré les pratiques culturales.

<sup>b</sup>Pour les scénarios printemps et été, les séries peu aptes ou inaptés sont exclues par le programme.



### Annexe 19. Classification globale des séries de sols (drainés)

Unités	Printemps non enfoui	Printemps enfoui	Été post levé	Automne enfoui
AC1	3l/v	3l	2l/v	3l
AI3	3l/v	3l	2l/v	3l
BC4n	3z/sk/sp/v	3z/sk/sp	3z/sk/sp	3z/sk/sp
CO	4z	4z	4z	4z
DA2	3l/v	3l	2l	3l
DU3jncqr	3z/m/r/sk/sp/v	3z/m/r/sk/sp/	3z/m/r/sk/sp	3z/m/r/sk/sp
HY3	3l/v	3l	2l/v	3l
Jl3m	3v	2l	2v/sp	2l/sp
JS2	3l/v	3l	2l/sp	3l
PI3	4z	4z	4z	4z
PV5	3v	2l	2r	2l/v
RS2	3l/v	3l	2l/v	3l
TH1b	3l/v	3l	3l/sp	3l
UB4	3v	2l	1	2l

Légende:

Classes: apte (1), moyennement apte (2), peu apte (3), inapte (4)

z aptitude à produire le maïs

v volatilisation

m conditions de mécanisation

sk surfertilisation en potassium

r ruissellement

sp surfertilisation en phosphore

l lessivage

### Annexe 20. Évaluation selon Heidlage et Shingleton

Risques de pollution des eaux			+ Potentiel de recyclage par le maïs		
Classe	Unités	Superficie totale	Classe	Unités	Superficie totale
1	Achigan	15 370 hectares (85%)	1	St-Aimé	13 369 hectares (74%)
	St-Aimé			St-Damase	
	St-Damase			St-Hyacinthe	
	St-Hyacinthe			Ste-Julie	
	Ste-Julie			Joseph	
	Joseph			Ste-Rose	
	Ste-Rose			St-Thomas	
	St-Thomas				
2	Cousineau	2 720 hectares (14%)	2	Achigan	4 221 hectares (23%)
	Providence			Providence	
	St-Urbain			St-Thomas	
3	Boucherville	127 hectares (1%)	3	Boucherville	627 hectares (3%)
	Du Mont			Cousineau	
	Pierreville			Du Mont	
				Pierreville	