

Université du Québec  
INRS-Eau

**CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES À LA  
POLLUTION (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique)**

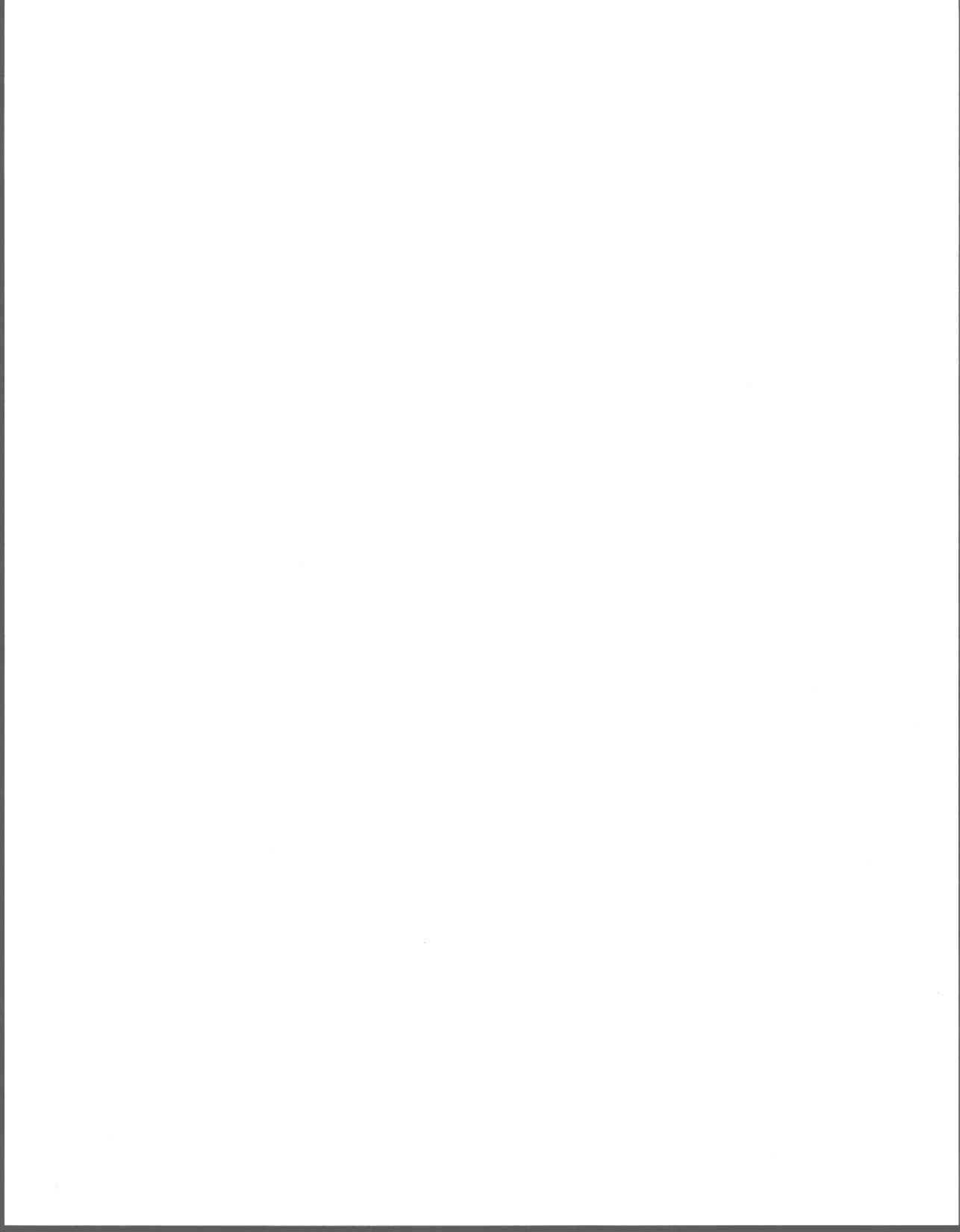
Par  
Doris Duchaine  
Baccalauréat en géographie

Mémoire présenté  
pour l'obtention  
du grade de Maître ès science (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur externe	Germain Tremblay Département de géographie Université Laval
Examineur interne	Jean-Pierre Fortin INRS-Eau
Directeur de recherche	Olivier Banton INRS-Eau
Codirectrice de recherche	Monique Bernier INRS-Eau

11 novembre 1998



## Remerciements

Sincères remerciements à mon directeur de recherche, M. Olivier Banton, pour avoir cru en moi et avoir apporté son soutien tout au long de ma maîtrise. À Mme Monique Bernier, ma codirectrice de recherche pour sa précieuse collaboration et son grand support. À M. Denis Richard (Agéos) et son équipe pour l'échange de données, ainsi qu'à MIR Télédétection pour avoir fourni l'image satellite. À Mme Marie-Emmanuelle Quentin pour son grand soutien technique. Je remercie également mes parents et ami(e)s pour leur compréhension et leur patience. Un remerciement tout spécial à Pierre et Daniel pour avoir su, chacun à leur façon, m'encourager lors des dernières étapes de création de ce mémoire. Finalement, à Patrick pour son sens critique.



## Résumé

Bien que les eaux souterraines ne constituent pas la principale source d'approvisionnement de la population québécoise, les problèmes croissants de qualité des eaux de surface forcent les municipalités à se tourner vers celles-ci. Progressivement, on assiste donc à une demande grandissante pour un approvisionnement en eau souterraine. La cartographie de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine permet d'évaluer et de prévenir les risques de contamination. L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) permet d'augmenter la rapidité et la précision de la cartographie, principalement en ce qui concerne l'occupation du sol. L'occupation du sol est un paramètre qui nous est fourni par la télédétection. La télédétection permet d'avoir une mise à jour de l'information sur une base régulière, ce qui est important pour la cartographie de l'occupation du sol, étant donné que l'information change, dans certains cas, annuellement. L'image satellite utilisée provient du capteur TM (Thematic Mapper) du satellite LANDSAT(Land satellite). Cette image a été prise le 23 août 1994. Idrisi est le SIG utilisé lors de cette étude. Les paramètres couplés avec le modèle mathématique EvaRisk permettent une évaluation des quantités d'eau, d'azote et d'atrazine infiltrées dans le sol. Par la suite, les calculs de concentrations peuvent être faits et une cartographie peut être réalisée. Puis, une carte représentant les épaisseurs d'argile est superposée aux cartes de concentrations et à la carte d'infiltration des eaux permettant une cartographie plus précise des concentrations risquant de se retrouver dans les eaux souterraines. Le territoire d'application situé dans la région environnante de Mirabel contient deux unités hydrogéologiques couramment rencontrées au Québec, soit les Basses-Terres du St-Laurent et le Bouclier canadien.



# TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX .....	viii
LISTE DES FIGURES .....	ix
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
1.1 Eaux souterraines .....	1
1.2 Problématique .....	1
1.3 Objectifs .....	2
<b>2 DESCRIPTION DES OUTILS TECHNIQUES</b> .....	<b>5</b>
2.1 Système d'information géographique (SIG) .....	5
2.2 La télédétection appliquée à l'hydrogéologie .....	7
2.2.1 Utilisation du sol .....	8
2.2.2 Type de sol .....	10
2.2.3 Relief .....	11
2.2.4 Linéaments .....	13
2.2.5 Évapotranspiration réelle .....	14
2.2.6 Réseau hydrographique .....	14
2.2.7 Autres paramètres .....	15
2.3 Le logiciel EvaRisk .....	15
2.3.1 Notion de vulnérabilité .....	16
2.3.2 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité .....	18
2.3.2.1 Résultats des méthodes d'évaluation .....	20
2.3.2.2 Choix de la méthode d'évaluation .....	21
2.3.3 Caractéristiques de l'outil développé .....	22
2.3.4 Développement des algorithmes .....	23
2.3.5 Interface usager d'EvaRisk .....	24
<b>3 MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>27</b>
3.1 Présentation de la région à l'étude .....	27
3.1.1 Contexte géologique .....	30
3.1.1.1 Socle rocheux .....	30
3.1.1.1.1 <u>Groupe de Beekmantown (Ordovicien)</u> .....	31
3.1.1.1.2 <u>Groupe de Potsdam (Cambrien)</u> .....	31
3.1.1.2 .....	31
3.1.2 Contexte tectonique .....	32
3.1.2.1 Dépôts meubles .....	34
3.1.3 Contexte hydrogéologique .....	34
3.1.3.1 Milieu aquifère .....	34
3.1.3.2 Piézométrie régionale .....	35
3.1.3.3 Paramètres hydrodynamiques .....	35
3.2 Traitement des données .....	36
3.2.1 L'image LANDSAT .....	36
3.2.2 La carte pédologique .....	40
3.2.3 Intégration de l'occupation du sol et de la pédologie .....	42

3.2.4	Relation entre le type de sol et l'occupation du sol .....	43
3.3	Utilisation d'EvaRisk .....	46
3.3.1	Couches de sol .....	46
3.3.2	Contenus en matière organique .....	46
3.3.3	Contenus en nitrates .....	47
3.3.4	Contenus en ammonium .....	47
3.3.5	Présence d'un drain .....	48
3.3.6	Végétation .....	48
3.3.6.1	Début et fin de croissance .....	48
3.3.6.2	Besoin en azote .....	49
3.3.6.3	Besoin en eau .....	49
3.3.6.4	Profondeurs des racines .....	50
3.3.6.5	Les pesticides .....	50
3.3.6.6	Les fertilisants .....	51
3.3.6.6.1	<u>Organiques</u> .....	51
3.3.6.6.2	<u>Chimiques</u> .....	51
3.4	Cartographie de la vulnérabilité .....	52
<b>4 RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>		<b>65</b>
4.1	Résultats .....	65
4.2	Discussion .....	68
<b>5 CONCLUSION .....</b>		<b>71</b>
<b>6 BIBLIOGRAPHIE .....</b>		<b>73</b>
<b>7 ANNEXE 1 .....</b>		<b>79</b>

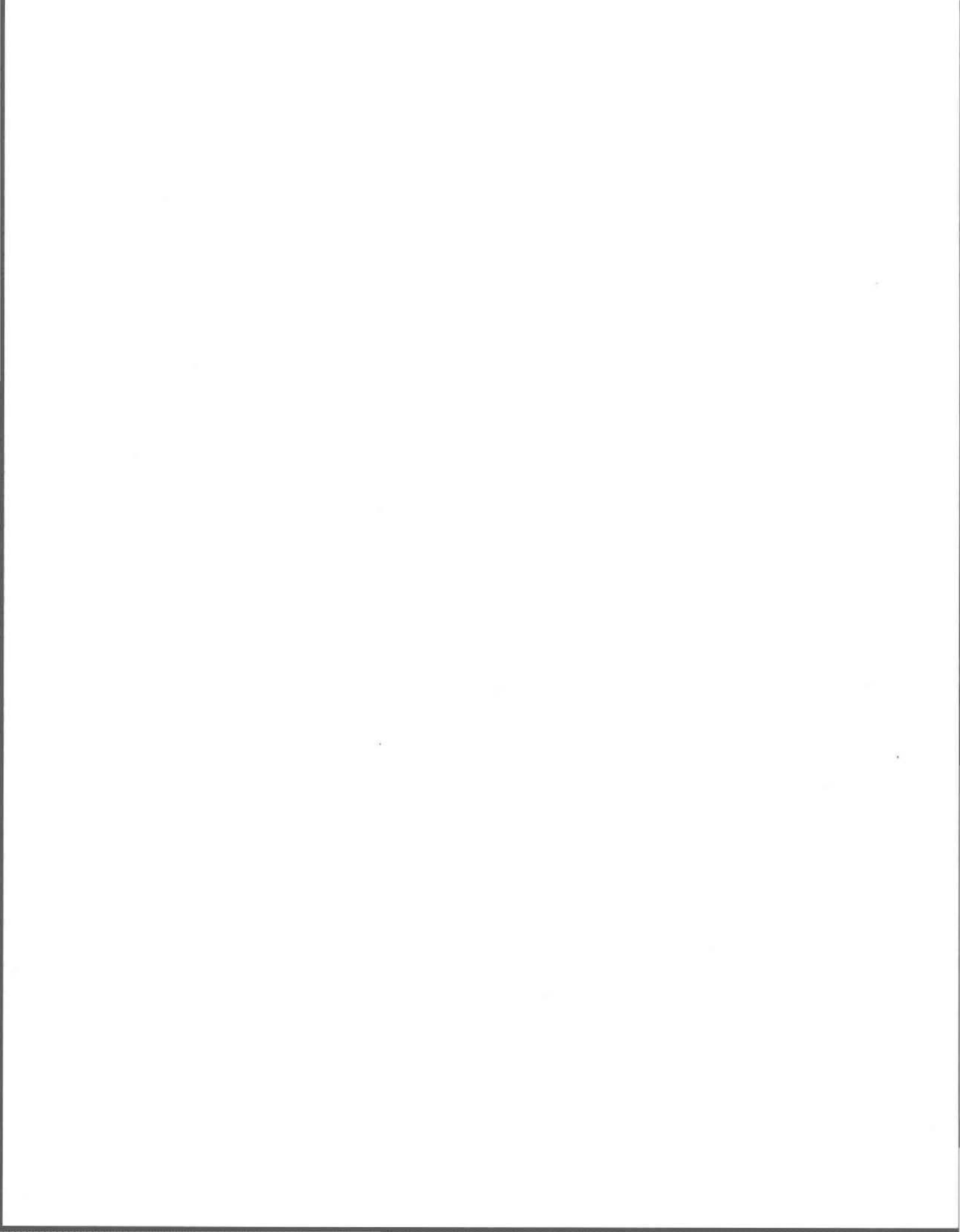
## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	: Paramètres hydrogéologiques obtenus à l'aide de la télédétection .....	8
Tableau 4.1	: Concentrations moyennes de nitrates .....	66
Tableau 4.2	: Concentrations moyennes d'atrazine .....	67
Tableau 4.3	: Concentrations maximales de nitrates .....	67
Tableau 4.4	: Concentrations maximales d'atrazine .....	68
Tableau 7.1	: Légende de la carte pédologique .....	79
Tableau 7.2	: Base de données .....	81



## LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Limite du territoire couvert dans la région à l'étude .....	28
Figure 3.2 : Occupation du sol de la région de Mirabel obtenue par MIR Télédétection de l'image LANDSAT du 23 août 1994 .....	38
Figure 3.3 : Carte numérisée représentant les types de sol selon la carte pédologique de Lajoie (1960) .....	41
Figure 3.4 : Occupation du sol après réduction de classes .....	45
Figure 3.5 : Concentrations moyennes de nitrates en mg/l .....	55
Figure 3.6 : Concentrations moyennes d'atrazine en mg/l .....	56
Figure 3.7 : Concentrations maximales de nitrates en mg/l .....	57
Figure 3.8 : Concentrations maximales d'atrazine en mg/l .....	58
Figure 3.9 : Quantité moyenne d'eau infiltrée (m) .....	59
Figure 3.10 : Concentrations moyennes de nitrates (mg/l) avec le masque d'argile .....	60
Figure 3.11 : Concentrations moyennes d'atrazine (mg/l) avec le masque d'argile .....	61
Figure 3.12 : Quantité d'eau infiltrée (m) avec le masque d'argile .....	63
Figure 3.13 : Indice de vulnérabilité DRASTIC (nappe captive) .....	63
Figure 3.14 : Indice de vulnérabilité DRASTIC (nappe libre) .....	64



# **1 INTRODUCTION**

---

## **1.1 Eaux souterraines**

Pour la majorité de la population, l'image du Canada en est une d'un pays de lacs, de cours d'eau et de glaciers étincelants. Les eaux souterraines, omniprésentes dans le sous-sol, ne font cependant pas partie de ce tableau. Il n'est donc pas surprenant que les préoccupations des Canadiens au sujet de la qualité de l'eau se focalisent surtout sur les eaux de surface, les lacs et les cours d'eau. Les ressources en eaux souterraines, moins visibles, mais d'une égale importance, ont suscité moins d'intérêt chez le public, sauf dans les régions du Canada où les gens en dépendent.

Les eaux souterraines représentent au Québec, environ 20% des sources d'approvisionnement en eau potable. Pour 60% des municipalités, ces sources constituent la principale provenance des eaux domestiques. Par contre, en région semi-rurale, 80% de la population est directement dépendante de ce type d'approvisionnement. Bien que les eaux souterraines ne constituent pas la principale source d'approvisionnement de la population québécoise, les problèmes croissants de qualité des eaux de surface forcent les municipalités à se tourner vers celles-ci. Progressivement, on assiste donc à une demande grandissante pour un approvisionnement en eau souterraine.

## **1.2 Problématique**

La contamination diffuse des eaux souterraines par divers types de produits utilisés dans le cadre des activités agricoles représente un problème environnemental majeur car la dégradation progressive de la qualité de ces eaux menace à moyen ou à long terme leur fonction de ressource en eau potable. La gestion où le contrôle de cette forme de pollution est rendu difficile à la fois par son caractère non localisé et par le fait qu'elle est le fruit d'une accumulation progressive, le constat de pollution tout comme celui de l'effet de mesures correctives n'étant souvent possible

qu'après un délai de plusieurs années. L'identification des zones à risque et la mise en place de mesures préventives adaptées aux conditions locales pourraient dans ce contexte constituer un instrument efficace au service d'une véritable politique de gestion des ressources naturelles.

L'eau souterraine étant de plus en plus en demande, la protection de celle-ci contre les contaminants devient primordiale. En grande majorité, les cas de contamination sont associés à des conditions hydrogéologiques défavorables où l'aquifère est peu protégé contre l'infiltration directe des contaminants. Au Québec, les sables, les alluvions et les aquifères de roches fissurées dont l'aire de réalimentation est affleurante, représentent les formations aquifères les plus vulnérables à la contamination.

Les sources de contamination des nappes aquifères sont nombreuses. Les plus fréquentes sont dues à l'utilisation sans discernement des sols pour l'élimination des déchets solides et liquides, à l'usage intensif des pesticides et des fertilisants, à l'épandage et au stockage des sels déglaçants ou des liquides abat-poussière et à l'exploitation non contrôlée des aquifères côtiers (intrusions salines).

### **1.3 Objectifs**

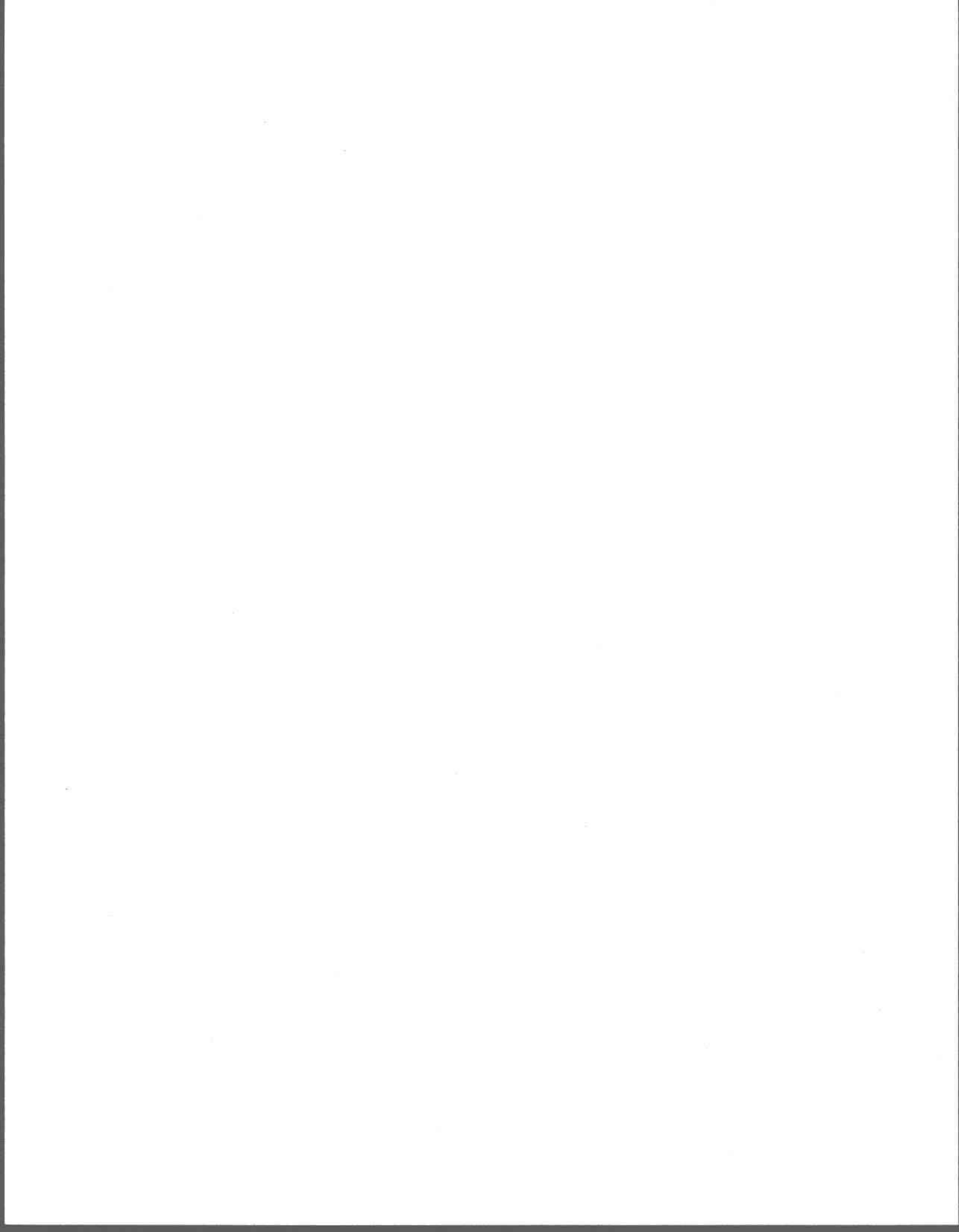
Ce mémoire de maîtrise s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche, plus global visant à développer une méthodologie de gestion et d'intervention en eaux souterraines, ainsi qu'un ensemble d'outils adaptés, et à les implanter au sein de l'entreprise privée et des municipalités. La cartographie de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine est un outil qui permet d'évaluer et de prévenir les risques de contamination. L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) permet d'augmenter la rapidité et la précision de la cartographie, principalement en ce qui concerne l'occupation du sol. Les paramètres qui vont par la suite être couplés avec le modèle mathématique EvaRisk (Banton *et al.*, 1998) devraient permettre une évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution plus rapide et plus adaptée au

territoire québécois que les méthodes déjà existantes telles DRASTIC (Aller *et al.* 1987).

DRASTIC est une méthode américaine de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. La vulnérabilité des aquifères est évaluée à l'aide de sept paramètres hydrogéologiques reportés sur sept cartes. C'est grâce à la superposition de ces sept cartes que l'on peut produire les cartes de vulnérabilité. Cette méthode a déjà été appliquée sur le même territoire que cette présente étude, soit la région environnante de Mirabel (Duchaine, 1995).

L'objectif général de ce mémoire est de produire une cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Cet objectif se divise en deux étapes. La première consiste à introduire la télédétection comme source de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines et par la suite intégrer celle-ci dans un SIG. La deuxième étape correspond au couplage des données recueillies à l'aide du modèle mathématique EvaRisk avec celles recueillies par le SIG, afin de créer les cartes de vulnérabilité des eaux souterraines.

Le chapitre 2 de ce mémoire présente une description générale des outils techniques, soit du système d'information géographique, de la télédétection ainsi que du logiciel EvaRisk. Le chapitre 3 est concentré sur la méthode utilisée lors de l'élaboration de ce mémoire, plus précisément sur la région à l'étude, le traitement des données, l'utilisation d'EvaRisk et la cartographie de la vulnérabilité. Le chapitre 4 présente les résultats obtenus ainsi qu'une discussion sur l'amélioration et l'optimisation de la méthode et des résultats. En conclusion, on discute des renseignements que l'on peut tirer de cette recherche.



## **2 DESCRIPTION DES OUTILS TECHNIQUES**

---

### **2.1 Système d'information géographique (SIG)**

Un système d'information géographique (SIG) est un système informatisé d'acquisition, de gestion, d'analyse et de représentation de données à référence spatiale. Les SIG ont un impact important dans tous les domaines concernés par la gestion et l'analyse d'informations à caractère spatial. Les personnes étrangères à cette technologie la considèrent souvent comme une boîte magique. La vitesse, la rigueur et la précision avec lesquelles elle opère sont impressionnantes et sa capacité de représentation graphique est attractive. Cependant, pour un utilisateur expérimenté, la philosophie des SIG est très différente. Les SIG ne sont qu'une simple extension de nos capacités d'analyse. Le système n'a pas de réponses propres, ce sont celles de l'analyste. C'est un outil au même titre que l'outil statistique, il aide à penser. Actuellement, il existe une grande variété de logiciels qui proposent ce type de traitements et qui se dénomment des SIG. Cependant, leur façon de gérer et de représenter l'information spatiale ainsi que la palette d'opérations proposées diffère grandement d'un logiciel à l'autre. Bien qu'un SIG soit souvent présenté comme un seul logiciel, il intègre plusieurs composantes (Eastman, 1995). Ces composantes sont le système de saisie numérique, le système de gestion de la base de données (SGBD), le système de traitement d'images, le système d'analyse statistique, le système de représentation cartographique, le système d'analyse spatiale, le tout en interaction avec la base de données spatiales et thématiques.

Le système d'information géographique qui est utilisé lors de cette étude est IDRISI. IDRISI (2.004) est un SIG en mode image, ainsi qu'un système de traitement d'images, développé au département de Géographie de l'Université de Clark. Il est conçu dans le but de fournir un mode d'accès peu coûteux aux technologies d'analyses géographiques assistées par ordinateur. Depuis son apparition en 1987, IDRISI s'est développé et il est devenu l'un des SIG et des systèmes de traitement d'images pour micro-ordinateur les plus diffusés. Il est utilisé dans plus de 80 pays dans le monde, par un large éventail d'institutions de recherche, d'organismes gouvernementaux

d'organisation et de gestion des ressources naturelles et d'organismes d'enseignement. Actuellement, le projet se poursuit grâce à une équipe qui y travaille de manière permanente suivant un plan de développement à long terme. IDRISI est un projet sans but lucratif développé au sein de la "Graduate School of Geography" de l'Université de Clark, en relation étroite avec l' "United Nations Institute for Training and Research" (UNITAR) et le "Global Resource Information Database" (UNEP/GRID).

En complément aux systèmes de base constituant un SIG, IDRISI propose un système qui permet le traitement des images de télédétection et qui inclut des procédures d'analyse statistique. Le traitement d'image permet de transformer le contenu original d'une image de télédétection en une information au contenu thématique exploitable à l'aide de procédures de classification.

Une autre distinction fondamentale entre les différents SIG réside dans leur façon de représenter numériquement l'information spatiale. Un système d'information géographique emmagasine les deux composantes de l'information décrite par une carte : la description des objets spatiaux et leurs caractéristiques thématiques. Tous les systèmes n'utilisent pas la même approche pour réaliser cette gestion; la grande majorité utilise toutefois une des deux techniques fondamentales de représentation : l'approche en mode objet (à structure vecteur) et l'approche en mode image (à structure "raster" ou en maille). Dans une représentation en mode objet, les limites ou les bordures des objets sont décrites comme une séquence de points qui, joints par des lignes, forment la représentation graphique de ces objets. Les points eux-mêmes sont décrits par une paire de coordonnées X,Y dans un système de référence tel que latitude/longitude ou UTM. En ce qui concerne la seconde forme majeure de représentation numérique, soit le mode image, la description des objets et celle de leurs caractéristiques thématiques constituent des fichiers à structure unique. En fait les entités spatiales décrites ne sont pas à proprement parlé des objets spatiaux, mais des unités d'observation qui résultent de la subdivision de la zone d'étude en un maillage de cellules rectangulaires (généralement carrées). Chaque cellule contient une valeur



numérique qui peut représenter soit un identificateur d'appartenance à un objet spatial, soit une catégorie, classe ou valeur thématique.

Quant à IDRISI, il intègre des éléments de ces deux modes de représentation numérique. Bien qu'il soit avant tout un système raster (en mode image), IDRISI utilise la structure vecteur comme forme principale d'importation des données à caractère spatial, par exemple le système routier et les cartes numérisées.

## **2.2 La télédétection appliquée à l'hydrogéologie**

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet détecté (Bonn et Rochon, 1992). Comme elle fait appel à des techniques en évolution rapide dans un monde en changement, ses possibilités d'application sont en croissance constante et l'on découvre de plus en plus de domaines où elle peut avantageusement remplacer des méthodes traditionnelles longues et coûteuses, ou encore intervenir comme un outil complémentaire qui améliore l'efficacité des méthodes conventionnelles éprouvées.

En cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines, les données de télédétection peuvent intervenir lors du calcul de différents paramètres, mais elles sont réduites à donner de l'information que sur les paramètres de surface. En ce qui concerne les paramètres traités par la télédétection, un tableau-résumé est présenté ci-après.

Tableau 2.1 : Paramètres hydrogéologiques obtenus à l'aide de la télédétection

Type de satellite	Information	Paramètre à extraire	Période de l'année
LANDSAT TM	utilisation du sol	calcul de la recharge par le ruissellement	printemps été automne
LANDSAT TM	type de sol	type de sol (pour l'infiltration)	printemps (sur sol nu)
ERS-1 LANDSAT TM RADARSAT	linéaments	présence potentielle d'eau souterraine dans les fractures	période où le sol est dégelé
AVHRR de NOAA	évapotranspiration réelle (obtenue indirectement)	calcul de la recharge (pour l'infiltration)	printemps été automne
RADARSAT	relief	pente	toute l'année
SPOT	relief	pente	printemps été automne
SPOT LANDSAT TM	réseau hydrographique	réseau hydrographique	été automne
RADARSAT	formes (structure)	géologie	été

### 2.2.1 Utilisation du sol

L'utilisation du sol est un paramètre qui a son importance dans l'étude de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines. Ce paramètre sert principalement lors du calcul de la recharge.

Auparavant, la cartographie de l'utilisation du sol était réalisée à partir de photographies aériennes et d'inventaires sur le terrain, mais aujourd'hui, au Québec, l'utilisation d'images satellites provenant du capteur TM (Thematic Mapper) du satellite américain LANDSAT est la procédure habituellement utilisée par les ministères et organismes privés.

Ce capteur a une faible répétitivité dans le temps. En effet, il passe à la verticale d'une même région tous les 16 jours. Il possède sept bandes spectrales fines, du bleu à l'infrarouge thermique. Sa résolution spatiale est de 30 mètres, sauf pour la bande thermique dont la résolution spatiale est de 120 mètres. Une bande spectrale correspond à un intervalle du spectre des longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique. Les images produites par le capteur TM du satellite LANDSAT sont découpées en scènes de 185 x 185 kilomètres.

La résolution spatiale de 30 mètres permet une bonne différenciation des parcelles agricoles, même dans les régions morphologiquement découpées comme les Basses-Terres du Saint-Laurent. L'utilisation de trois bandes spectrales TM3, TM4 et TM5 est suffisante pour la distinction des principales cultures (Bernier et al, 1984b). Cette cartographie de l'utilisation du sol est faite à l'aide d'une classification informatisée appelée classification dirigée, ce qui implique que l'on connaît, a priori, les types de culture de la région à l'étude. Ainsi, en 1986, il a été possible de produire pour la MRC de l'Assomption une carte de l'utilisation du sol à l'échelle du 1/20 000 avec une précision de 72 % (Carignan et al., 1987). Les coûts associés à cet inventaire étaient inférieurs à ceux de la méthode conventionnelle de relevés de terrain.

Selon une étude de Cluis et al.(1991), qui portait sur l'évaluation des données d'utilisation du sol acquises par classification d'une image LANDSAT et intégrées dans un système d'information géographique à vocation environnementale, on retrouve trois facteurs en faveur de l'acquisition de données satellitaires pour ce type de cartographie : la facilité d'intégration de l'image classifiée comparativement au temps de numérisation requis pour la carte provenant d'un relevé de terrain;

la précision atteinte tant au niveau de la différenciation des types de culture qu'au niveau de la résolution spatiale, conférant à cette source d'information une supériorité par rapport aux cartes numériques de l'inventaire des Terres du Canada ; enfin, la possibilité d'une mise à jour de l'information sur une base régulière.

### 2.2.2 Type de sol

Le type de sol est un paramètre important pour cette étude, car si le sol est perméable, le contaminant pourra le traverser avec facilité, alors que s'il est compact, le contaminant sera ralenti et ne se rendra probablement pas à l'aquifère. Les pédologues ont depuis longtemps recours aux photographies aériennes pour les aider dans leurs opérations de cartographie des sols. Avec l'apparition des images satellitaires, ils ont obtenu deux catégories d'informations additionnelles : une plus grande couverture spatiale et la possibilité de découper spectralement l'information, c'est-à-dire de relier la tonalité de l'image à la couleur du sol.

La richesse spectrale du capteur TM de LANDSAT permet une séparation des classes de sols compatible avec les exigences de la cartographie aux échelles du 1/200 000 au 1/100 000 (Collectif, 1996). Par exemple, dans le cas d'une recherche au Maroc, l'apport des canaux du moyen infrarouge TM 5 et TM 7 a été très important, puisqu'il a permis de séparer des classes de sol qui étaient très proches l'une de l'autre dans le visible et le proche infrarouge (Merzouk, 1994). Il est évident que dans les régions où la couverture végétale est dense, la reconnaissance directe des sols est beaucoup plus difficile, il faut s'appuyer sur une base de connaissances extérieures expliquant les relations entre les types de sols et les formations végétales naturelles. Cependant, au Québec, il est préférable de prendre des images en mai ou au début de juin alors que les cultures n'ont pas encore eu le temps de croître. C'est à ce moment que le sol est le plus visible et où l'interprétation est la plus simple.

La télédétection appliquée aux sols est un outil d'identification, de diagnostic et de modélisation

quand elle est combinée avec les systèmes d'information géographique (SIG). Elle permet de définir un certain nombre d'indicateurs de la nature et de l'état de dégradation des sols dans un contexte géographique donné. Elle ne remplace cependant pas une bonne connaissance du terrain, mais permet de la compléter et de l'interpoler entre les points d'observation détaillée. La combinaison entre les données de télédétection et les SIG permet de réaliser plus facilement la cartographie de la vulnérabilité de l'eau souterraine.

### 2.2.3 Relief

La valeur des pentes du relief est un paramètre que l'on recherche en hydrogéologie. En général, le risque de contamination des eaux souterraines diminue en effet, avec l'augmentation de la pente du terrain, puisqu'une pente forte favorisera le ruissellement, réduisant par le fait même le risque d'infiltration des contaminants.

Les pentes peuvent être calculées de façon numérique à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA). Dans les pays industrialisés, le modèle numérique d'altitude est généralement calculé à partir des courbes de niveau figurant sur les cartes topographiques. Il se présente sous la forme d'un fichier en mode image. Cependant, en l'absence de cartographie de qualité, comme dans la majeure partie des pays en voie de développement, les modèles numériques d'altitude extraits d'images satellitaires représentent un apport majeur. Pour obtenir des images stéréoscopiques, on devait auparavant prendre des photographies aériennes à deux angles différents. Aujourd'hui, une autre méthode permet d'avoir des images stéréoscopiques et ce à partir de satellites. En effet, le satellite français SPOT permet la prise d'images stéréoscopiques (Bonn et Rochon, 1992). La capacité de visée oblique de SPOT permet de réaliser des couples stéréoscopiques par combinaison de deux prises de vue d'une même zone acquise sous deux angles différents grâce à la parallaxe ainsi créée. Au Québec, ces images doivent être prises de mai à octobre, car le faible éclaircissement solaire durant l'hiver et la neige affectent beaucoup les contrastes des images.

D'après la compagnie française SPOT (site Internet), les images ainsi créées sont utilisées principalement en stéréo-restitution, en cartographie topographique, en stéréo-corrélation automatique à partir de laquelle sont établis directement les modèles numériques d'altitude (MNA) sans avoir recours à des documents cartographiques.

Avec la mise en place du programme ADRO (1996-1998) portant sur les activités de recherche et développement, l'Agence Spatiale Canadienne, Radarsat International inc. et la NASA comptent montrer l'intérêt de l'utilisation des images du satellite canadien RADARSAT pour la cartographie et le suivi des ressources naturelles. Parmi les 320 projets retenus figurent ceux auxquels participe SPOT Image, soit la production de MNA à partir des données RADARSAT et l'utilisation de ces données SAR à des fins cartographiques.

Un projet représenté par SPOT Image, Istar et le CNES et qui s'étalera sur une période d'un an, portera sur la production d'un MNA de bonne qualité sur le site de Marseille, à la fois par interférométrie et par radargrammétrie. Cette dernière technique très intéressante est rendue possible grâce à la possibilité de variation de l'angle d'incidence du radar à ouverture de synthèse (RAS). Elle permettra, si les études sont positives, de générer plus facilement des MNA à partir de couples stéréoscopiques. L'étude portera en particulier sur l'analyse de la précision des MNA obtenus, le choix des meilleures visées, et bien sûr leur positionnement par rapport à d'autres sources de données stéréoscopiques comme SPOT ou des cartes topographiques. Le satellite RADARSAT est le premier satellite radar offrant différents niveaux (modes) de programmation des acquisitions. Comme le radar des satellites européens ERS 1 et 2, celui de RADARSAT se joue des nuages, du brouillard, de la fumée et obtient des images de bonne qualité, de jour comme de nuit. De plus, à l'aide d'un capteur radar, la période de l'année n'a plus d'importance pour la prise de vue étant donné que le radar se rend généralement au sol, sans tenir compte de la neige.

### 2.2.4 Linéaments

Les linéaments sont des éléments rectilignes ou curvilignes qui expriment la présence de phénomènes plus profonds, tels des failles, des fractures et des contacts géologiques (O'Leary *et al.*, 1976). Sur les images d'origine aéroportée ou spatiale, les linéaments sont mis en évidence par l'organisation particulière de la topographie, l'hydrographie et la végétation. Au niveau numérique, les linéaments sont des discontinuités de brillance, c'est-à-dire des changements brusques de niveaux de gris, où ils apparaissent comme des alignements spectraux similaires. Les linéaments peuvent donner une idée sur la présence d'eau souterraine. Le caractère multispectral des capteurs TM de LANDSAT et HRV de SPOT permet également de combiner plusieurs bandes spectrales dans le domaine de l'infrarouge et du visible. Selon une étude portant sur le bassin sédimentaire de la Volta au Ghana central (Sander *et al.*, 1996), l'étude des linéaments peut se faire avec l'aide des données de télédétection telles : des images de LANDSAT, des images de SPOT et une photographie aérienne. Les données de télédétection ont permis une cartographie réelle des linéaments qui indiquent la présence potentielle d'eau souterraine dans les fractures. Cependant, c'est à l'aide des données du capteur TM de LANDSAT que les résultats ont été les plus représentatifs étant donné la diversité de ses bandes spectrales. En ce qui concerne les images prises avec LANDSAT, elles ont été interprétées en utilisant un composé coloré (images fausses couleurs) des bandes TM 4, TM 5 et TM 3.

À cause de sa grande sensibilité aux variations du relief, l'imagerie radar est particulièrement utile pour la cartographie des linéaments (ERS-1 et 2, RADARSAT). Selon De Sève *et al.* (1994), les données radar du satellite ERS-1 ont permis une vision synoptique du territoire et ce indépendamment des conditions climatiques. L'image radar ERS-1 a détecté près des deux tiers (66%) des linéaments identifiés sur la carte géologique de Rondot (1989), et ce, malgré la résolution radar de 30 m, les problèmes de rabattement et d'invisibilité caractéristique des images radar. Une étude récente faite à l'aide de RADARSAT a permis de trouver des gisements miniers sur le territoire du Nouveau-Québec. Pour ce type de territoires faiblement cartographiés et

difficile d'accès, on a avantage à se servir de tels systèmes pour cartographier les linéaments.

### **2.2.5 Évapotranspiration réelle**

L'estimation de l'évapotranspiration réelle des couverts végétaux (ETR) a fait l'objet d'une attention particulière à partir du capteur thermique de NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) (Collectif, 1996). Le principe est l'utilisation d'un modèle simplifié de bilan qui relie ETR, température de surface ( $T_s$ ), température de l'air ( $T_a$ ) et rayonnement net ( $R_n$ ).  $T_a$  et  $R_n$  sont définis ponctuellement à partir des observations en stations météorologiques, tandis que  $T_s$  est cartographié sur les images AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Des résultats intéressants ont été obtenus en France, en Algérie et au Maroc, mais les limites d'application sont fortes du fait de la résolution spatiale grossière des images AVHRR : en particulier les cultures doivent être homogènes (en essences et en relief) sur de grandes superficies (plusieurs kilomètres carrés). La détermination de  $T_s$  avec une précision suffisante exige également une bonne correction des effets atmosphériques et une connaissance des émissivités des surfaces cartographiées. En hydrogéologie, l'évapotranspiration peut servir lors du calcul de la recharge.

### **2.2.6 Réseau hydrographique**

Grâce à l'excellent contraste entre l'eau et l'environnement végétal ou minéral dans les bandes du proche et du moyen infrarouge, l'extraction du réseau hydrographique sur images multispectrales (LANDSAT ou SPOT) donne de bons résultats. En effet, l'eau absorbant bien l'infrarouge, la détermination de celle-ci s'effectue facilement et automatiquement dans la plupart des situations. Cependant, une eau fortement chargée en matière en suspension va se confondre avec les sols sombres alors que l'eau recouverte de végétation aquatique va se confondre avec la végétation riveraine (Collectif, 1996). Les images satellites doivent être prises lorsque les cours d'eau sont libres de glace (Collectif, 1996). Le réseau hydrographique peut également être cartographié à l'aide d'un capteur radar, tel que ERS-1 et 2 et RADARSAT.



### 2.2.7 Autres paramètres

En ce qui concerne les autres paramètres pouvant être utilisés lors de la cartographie de la vulnérabilité de l'eau souterraine à la pollution, ils ne peuvent pas être observés directement par la télédétection étant donné que ce sont des paramètres en profondeur. Les paramètres tels la profondeur de l'eau, le milieu aquifère, la zone vadose et la conductivité hydraulique sont des paramètres observés plus généralement à l'aide de forages.

## 2.3 Le logiciel EvaRisk

Le logiciel EvaRisk 1.0, qui a été conçu à l'Institut National de la Recherche Scientifique (Banton *et al*, 1998), est un outil visant à évaluer la vulnérabilité des ressources d'eau souterraine face à diverses sources de contaminations diffuses. Les sels déglacants, les pesticides, les fertilisants azotés et les hydrocarbures représentent les sources diffuses qui sont prises en compte. Considérant la variabilité spatiale des paramètres et facteurs conditionnant les processus hydrologiques, ceux du cycle de l'azote et du destin des pesticides et des hydrocarbures, une approche de modélisation stochastique est utilisée dans EvaRisk 1.0. Parmi les différentes approches stochastiques de modélisation, la technique de Monte Carlo a été retenue. Elle consiste à réaliser un ensemble de simulations déterministes pures pour chacune desquelles les valeurs des paramètres sont tirées aléatoirement (tirage Monte Carlo) dans les distributions statistiques déclarées des valeurs de chaque paramètre. Cet ensemble de simulations est considéré représentatif de l'ensemble des conditions locales statistiquement susceptibles d'être rencontrées dans l'espace étudié. Afin d'obtenir une interface simple tout en conservant la variabilité spatiale, tous les paramètres fournis par l'utilisateur sont considérés comme ayant une distribution normale avec un écart-type de 10% de la valeur fournie. Certains paramètres internes utilisent cependant d'autres distributions. Tels par exemple les contenus en argile, limon et sable des textures qui sont représentées à l'aide d'une distribution uniforme.

Son application selon une approche régionale a pour but de mieux gérer et de mieux exploiter les ressources d'eau souterraine, en évaluant leur vulnérabilité par rapport aux sources potentielles de contamination. Les sources de pollution à l'échelle régionale sont les sels déglaçants, les pesticides et les fertilisants. Dans le logiciel EvaRisk, plusieurs données sont nécessaires. En ce qui concerne les données concernant le site, EvaRisk requiert la texture et l'épaisseur des couches du sol, leurs contenus en matière organique, en nitrate, et en ammonium, et la déclaration de la présence d'un drain. Pour ce qui est de la végétation, on a besoin des renseignements sur le début et la fin de la croissance, le besoin en azote et en eau, et la profondeur des racines. Par la suite, il faut déclarer certaines informations sur les pesticides et sur les fertilisants (organiques ou chimiques), et les différentes quantités appliquées.

EvaRisk génère automatiquement deux types de résultats différents sous forme de fichiers et de graphiques : les flux (masse exportée) d'eau, de sels de déglçage, de nitrates, de pesticides et d'hydrocarbures exportés pour lessivages, ruissellement et drainage, ainsi que les concentrations en sels de déglçage, en nitrates, en pesticides et en hydrocarbures dans les différents flux d'eau. Les résultats sont fournis sur une base hebdomadaire.

### **2.3.1 Notion de vulnérabilité**

La contamination et la pollution sont liées à la présence d'un altérogène dans le milieu, provoquant une altération de la qualité de l'eau souterraine. La contamination ne devient pollution que lorsque cette altération présente des effets de nuisance ou de gêne envers l'utilisateur, et a fortiori un risque pour sa santé, et compromet ainsi l'utilisation de cette eau (Simard et al., 1977). La vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination est un concept complexe, mal défini et qui peut représenter autant la sensibilité et la susceptibilité à la contamination, que les conditions naturelles qui influencent la pénétration, la propagation des contaminants et même leur purification dans le milieu. La vulnérabilité, peut être définie à trois niveaux distincts.

Au premier niveau, la vulnérabilité se définit comme l'aptitude d'un système en eau souterraine à être contaminé, c'est-à-dire son inaptitude à être protégé d'une contamination. Ce phénomène est lié à la dynamique externe au système, donc aux différentes conditions influençant la pénétration du contaminant dans le système. Les conditions régissant la vulnérabilité à ce premier niveau sont donc liées au contaminant lui-même, et aux conditions prévalant dans la zone non-saturée du sol au travers de laquelle le contaminant migre jusqu'à l'eau souterraine.

Au second niveau, la vulnérabilité intègre l'aptitude des eaux souterraines à propager et à conserver la contamination. C'est le domaine de la dynamique interne du système. Les conditions existant dans le milieu aquifère conditionnent le transport, la dispersion et la persistance du contaminant.

Le troisième niveau prend en considération les caractéristiques "polluantes" du contaminant, liées aux effets de gêne et de nuisance, aux concepts de normes, de seuils, et d'aptitude ou inaptitude à l'usage prévu. Ce niveau est donc celui de l'utilisation de l'eau comme source d'alimentation en eau potable, usage pour lequel l'eau doit répondre à certains critères.

Une vulnérabilité définie au premier niveau n'autorise aucune pénétration de contaminant dans le système. Au contraire, une vulnérabilité définie au troisième niveau autorise une entrée de contaminant dans le système, à condition que la concentration en contaminant dans l'eau prélevée dans le système ne rende pas celle-ci inapte à l'utilisation envisagée.

Il apparaît tout de suite que le premier niveau (type gestion écologique environnementale) sera le plus strict, mais sera aussi de ce fait celui qui permettra la conservation de la ressource pour toute utilisation future. Le second niveau est celui utilisé généralement pour la définition des périmètres (ou aires) de protection des captages, qui est un cas particulier de protection des eaux souterraines.

Les facteurs influençant le potentiel de contamination des eaux souterraines sont nombreux et de diverses natures. Caractériser les agressions et les défenses nécessite de connaître les facteurs liés à celles-ci. Les différents facteurs intervenant et influençant la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination sont ceux liés aux phénomènes de pénétration et de propagation dans l'aquifère, ou différemment, à l'émission (sources et types de contamination), au transport (hydrogéologie), à la persistance et/ou rétention (contaminants, hydrochimie) et à l'utilisation de la ressource (captage, consommation). Les facteurs intervenant dans ces phénomènes, et leur influence sur la vulnérabilité, dépendent des niveaux de définition de la vulnérabilité.

### **2.3.2 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité**

L'objectif d'une étude de la vulnérabilité d'un système en eau souterraine à la contamination est de fournir le potentiel et le degré de risque de contamination, mais aussi le degré des conséquences possibles d'une contamination, de même que les éléments nécessaires, tant pour la prévention que pour les mesures à mettre en place à la suite d'une contamination. L'objectif doit aussi englober l'étude des différents scénarios correspondant aux différentes possibilités et alternatives qui s'offrent au niveau de la gestion du contaminant, étude devant conduire à la sélection du scénario le moins dommageable pour la ressource. Les objectifs et buts à atteindre sont donc multiples et de différentes natures.

Les méthodes d'évaluation, bien que devant être précises, fiables et faciles d'utilisation, se doivent aussi d'être simples, rapides et peu onéreuses, même (ou surtout) si elles ne sont que des études préliminaires. Celles-ci peuvent être désirées pour une décision de planification d'aménagement, pour une présélection de sites, pour un travail de première approche ou même pour l'implantation d'un captage en un lieu de risque minimal. Elles doivent être avant tout des outils de gestion

pratiques et souples afin d'être utilisées par le plus grand nombre d'intervenants. Elles doivent être simples d'utilisation afin d'être appliquées dans tous les cas, sans réticences ou restrictions, et ainsi répondre à leurs finalités.

Parmi les différentes approches ou méthodologies appliquées à l'évaluation du risque, la plus ancienne et la plus fréquemment utilisée est l'expertise, en tant qu'étude menée par un spécialiste ou un comité de spécialistes, tels que des agronomes, des hydrogéologues, etc. L'expertise est une démarche plus ou moins subjective, dont le résultat (validité-fiabilité) doit pour beaucoup à l'expérience professionnelle, tant sur le sujet même de la vulnérabilité, que sur la connaissance du contexte régional. Dans une expertise, les facteurs utilisés directement ou indirectement sont nombreux, d'autant plus qu'ils le sont souvent de façon intuitive. Pour pallier à l'oubli possible d'un facteur important ou déterminant, on peut utiliser une matrice d'aide à la décision, qui propose un cheminement pour l'analyse du problème, au travers des différents paramètres du contaminant et du milieu, cheminement conduisant à la décision. En cela la méthode ne fournit pas d'évaluation, mais seulement une méthodologie d'expertise.

Les méthodes à indexation (ou à indices) tentent de fournir une méthodologie standardisée pour l'évaluation du potentiel de contamination des eaux souterraines. Certaines d'entre elles essaient de donner de plus une technique de représentation standardisée des différents degrés de vulnérabilité. C'est entre autres le cas de la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987), méthode actuellement utilisée aux États-Unis pour cette évaluation. Cependant, comme l'ont montré, entre autres, les travaux de Banton et Villeneuve (1989), ce type de méthode présente de grands défauts. Étant basée sur une évaluation relative des risques d'un site par rapport à un autre, elle n'en permet pas l'évaluation absolue pour un site seul. Tendante à uniformiser le degré de vulnérabilité de tous les systèmes en eau souterraine par l'addition des indices de pondération, elle limite la différenciation nette des sites non-vulnérables de ceux vulnérables. Finalement, elle ne prend pas en compte les caractéristiques propres du contaminant qui peuvent influencer

différemment son comportement d'un site à l'autre.

Un nombre croissant de travaux rapporte l'application des modèles mathématiques de simulation du transport des contaminants comme outil d'évaluation du risque de contamination. Les modèles peuvent être classés de plusieurs manières. Une classification possible est celle-ci (Van Genuchten, 1978):

- modèles descriptifs;
- modèles physiques (modèle réduit, essai en colonne);
- modèles analogiques (montage électrique);
- modèles mathématiques:
- empiriques ou conceptuels (modèle entrée-sortie, régressions);
- déterministes ou stochastiques (basés sur les processus).

Leur intérêt est de pouvoir, dans un cas donné, prévoir le devenir d'une contamination et ainsi d'étudier les différents scénarios envisageables pour prévenir ou limiter cette contamination.

### **2.3.2.1 Résultats des méthodes d'évaluation**

Les résultats peuvent se présenter sous diverses formes, dépendant entre autres de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité employée. Les résultats d'une expertise sont usuellement l'acceptation ou le refus de l'utilisation du produit concerné, ou des recommandations spécifiques concernant par exemple les doses ou les techniques d'application. Une méthode à indexation fournit un indice pour un site et un cas donné, indice représentant le degré de vulnérabilité des eaux souterraines, réparti en classes, au moyen de codes standardisés. Les résultats des modèles mathématiques se présentent généralement sous forme de valeurs, représentant les concentrations ou les masses de contaminant présentes dans l'eau souterraine. Ces résultats peuvent être présentés sous diverses formes: tableaux, courbes, profils, cartes d'isovaleurs, etc. Ces résultats,

qui correspondent à des valeurs ayant une réalité physique pouvant être mesurée réellement, permet donc leur comparaison à des valeurs de référence telles des critères ou des normes de qualité.

La cartographie manuelle de la vulnérabilité repose généralement sur la délimitation de zones affectées d'un degré de vulnérabilité. La délimitation est basée sur les caractéristiques des terrains sus-jacents à l'eau souterraine (sols), sur celles de l'aquifère et sur l'usage de l'eau. Elle est souvent compilée à partir des cartes préexistantes de pédologie, d'hydrogéologie, d'utilisation de l'eau, etc. La cartographie est en général une forme de représentation très utilisée et très commode pour présenter les différents résultats des diverses méthodes d'évaluation. La représentation des degrés de vulnérabilité en classes (fourchettes de valeurs) permet une visualisation rapide du risque concernant une zone donnée, et la comparaison aisée du risque de différentes zones.

### **2.3.2.2 Choix de la méthode d'évaluation**

Parmi les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination, l'orientation du choix pour une de ces méthodes dépend principalement d'une part, de l'objectif visé et, d'autre part, du concept rattaché à la vulnérabilité.

Parmi les différentes méthodes d'évaluation présentées, il apparaît que le seul type de méthodes pouvant répondre aux préoccupations et aux objectifs visés pour notre problématique est celui des modèles mathématiques de simulation du transport des contaminants dans les sols et dans les eaux souterraines. En effet, ce sont les seuls outils qui prennent en compte les processus physiques, chimiques et biologiques régissant le transport et la persistance de ces contaminants.

Les modèles fournissent, avec une précision dépendant bien entendu du modèle lui-même, des

résultats ayant une réalité physique définie (concentration, masse cumulée, débit, temps), confrontables aux mesures réelles in situ. Ces résultats peuvent être interprétés sans ambiguïté, par comparaison avec des références et des normes. Ce sont en ce sens des méthodes fiables et reproductibles qui, dans certains cas, peuvent être même utilisées par des non-spécialistes.

La notion de risque de contamination ou de vulnérabilité d'une ressource en eau souterraine est reliée à la fois aux caractéristiques de la zone tampon entre la surface du sol et l'aquifère, et à celles du contaminant spécifiquement mis en cause. L'évaluation des risques peut être réalisée par la simulation de la propagation de ce contaminant jusqu'à la nappe, conduisant à l'évaluation des concentrations susceptibles d'atteindre celle-ci. Cette simulation est cependant rendue complexe du fait du grand nombre de processus mis en jeu dans l'écoulement de l'eau et dans le transport du contaminant, et du nombre élevé de paramètres qui y sont reliés.

### **2.3.3 Caractéristiques de l'outil développé**

L'outil EvaRisk est développé sous la forme d'un logiciel fonctionnant sur micro-ordinateur sous Windows. Il permet une évaluation facile et rapide des risques de contamination tout en étant fiable et précis. Ce logiciel est développé selon le concept des modèles mécanistes simplifiés. Ces modèles basés sur les processus dominant le devenir des contaminants permettent d'obtenir un résultat fiable tout en ne nécessitant qu'une information limitée et facile d'obtention. Pour la déclaration de cette information de base, l'outil simplifié propose, pour l'ensemble des caractéristiques nécessaires à l'évaluation, un choix d'éléments intégrateurs.

Le type d'information requise par le logiciel est par exemple le choix du type de sol parmi différentes classes texturales possibles depuis le sable jusqu'à l'argile. L'information détaillée relative à chacun de ces types de sol est incluse dans le modèle, telles que les valeurs standard de conductivité hydraulique, de porosité, de capacité au champ et de densité. L'avantage de ce



genre d'approche est donc de ne nécessiter qu'un nombre très limité d'informations faciles à obtenir et qui constitue le minimum des connaissances détenu par un utilisateur pour traiter un cas. Au travers de menus déroulants, l'utilisateur peut sélectionner divers contaminants potentiels sans pour cela devoir connaître leurs caractéristiques spécifiques. Ce logiciel permet donc une évaluation rapide, fiable et quantitative sans que le gestionnaire ne doive connaître l'ensemble des paramètres du sol et du contaminant. Dans EvaRisk, les données saisies par l'utilisateur et ayant des conséquences sur le bilan hydrique sont principalement la texture, le climat, la pente et l'occupation du territoire (culture, etc.). De la même façon, un menu propose des climats typiques auxquels sont rattachés les paramètres nécessaires à l'outil.

#### **2.3.4 Développement des algorithmes**

Le développement du logiciel EvaRisk a bénéficié de la grande expertise de l'équipe de l'INRS-Eau en matières de développement de logiciels (VulPest, AgriFlux, Sylvie) visant l'évaluation des risques de dégradation des ressources en eau, principalement souterraine. Cette grande expertise comprend de nombreux travaux de recherches ayant porté sur l'identification et la représentation des processus contrôlant le devenir des contaminants. Elle comprend aussi et bien entendu une très longue expérience dans le domaine du génie logiciel au niveau du développement d'outils de gestion pratiques et fiables.

Le fondement théorique d'EvaRisk s'appuie donc en grande partie sur les travaux précédents de l'INRS-Eau ayant conduit entre autres au développement du modèle AgriFlux2.0 (Banton et Larocque, 1997), un modèle simulant les flux d'eau ainsi que les transformations de l'azote et des pesticides dans la zone non saturée du sol. AgriFlux2.0 est un modèle mécaniste et stochastique, c'est-à-dire basé sur une représentation physique des processus tout en tenant compte de la variabilité des paramètres. Il a été testé dans différentes situations (Banton *et al.*, 1995 ; Dupuy *et al.*, 1997a et 1997b ; Larocque *et al.*, 1997 ; Larocque et Banton, 1995 et 1996) montrant une

très bonne adéquation entre les résultats calculés et ceux observés, autant au niveau des flux d'eau, de nitrates que de pesticides. On peut donc considérer que les algorithmes de calcul des processus sont fiables et performants.

Ces algorithmes ont ainsi servi de base au développement du moteur de calcul d'EvaRisk, même si ce dernier outil est d'une philosophie complètement différente d'AgriFlux; le premier se voulant en effet un outil rapide bien que fiable pour l'évaluation de nombreuses situations pour lesquelles l'information est rarement connue avec précision; le second permettant une simulation très précise des flux journaliers mais requérant des données d'entrée plus nombreuses nécessitant des investigations de terrain.

Un certain nombre de simplifications et de modifications (comparativement à la philosophie de développement d'AgriFlux) ont été apportées au logiciel EvaRisk afin de permettre la simulation de différents composés dans un contexte de gestion à l'échelle régionale. EvaRisk peut simuler le transport des sels de déglacage, les transformations et la migration des hydrocarbures miscibles, des pesticides et des nitrates reliés à l'épandage de fertilisants. Le bilan hydrique et celui de la température du sol sont simulés dans toutes les situations car ils sont nécessaires dans le calcul des différentes transformations et dans la simulation de la migration des différents composés dans le sol.

### **2.3.5 Interface usager d'EvaRisk**

La déclaration de l'information nécessaire à l'utilisation d'EvaRisk a été minimisée de manière, d'une part, à faciliter son utilisation par le gestionnaire du territoire et, d'autre part, à limiter les risques de biais possibles pouvant être entraînés par la déclaration d'une valeur aberrante résultant de la méconnaissance d'un paramètre. Ainsi, l'information demandée à l'utilisateur se restreint à une

très bonne adéquation entre les résultats calculés et ceux observés, autant au niveau des flux d'eau, de nitrates que de pesticides. On peut donc considérer que les algorithmes de calcul des processus sont fiables et performants.

Ces algorithmes ont ainsi servi de base au développement du moteur de calcul d'EvaRisk, même si ce dernier outil est d'une philosophie complètement différente d'AgriFlux; le premier se voulant en effet un outil rapide bien que fiable pour l'évaluation de nombreuses situations pour lesquelles l'information est rarement connue avec précision; le second permettant une simulation très précise des flux journaliers mais requérant des données d'entrée plus nombreuses nécessitant des investigations de terrain.

Un certain nombre de simplifications et de modifications (comparativement à la philosophie de développement d'AgriFlux) ont été apportées au logiciel EvaRisk afin de permettre la simulation de différents composés dans un contexte de gestion à l'échelle régionale. EvaRisk peut simuler le transport des sels de déglacage, les transformations et la migration des hydrocarbures miscibles, des pesticides et des nitrates reliés à l'épandage de fertilisants. Le bilan hydrique et celui de la température du sol sont simulés dans toutes les situations car ils sont nécessaires dans le calcul des différentes transformations et dans la simulation de la migration des différents composés dans le sol.

### **2.3.5 Interface usager d'EvaRisk**

La déclaration de l'information nécessaire à l'utilisation d'EvaRisk a été minimisée de manière, d'une part, à faciliter son utilisation par le gestionnaire du territoire et, d'autre part, à limiter les risques de biais possibles pouvant être entraînés par la déclaration d'une valeur aberrante résultant de la méconnaissance d'un paramètre. Ainsi, l'information demandée à l'utilisateur se restreint à une

connaissance minimale de base qui devrait dans tous les cas être connue de l'utilisateur.

Pour la déclaration du site, les seules informations spécifiques ont trait à la nature du sol en termes de texture, au contenu en matières organiques pour la simulation des composés organiques (pesticides et hydrocarbures) et à ceux en nitrates et ammonium pour le cas de l'évaluation de la fertilisation. Au niveau des climats, l'usager peut utiliser un climat typique du Québec sans avoir besoin de déclarer les valeurs moyennes mensuelles nécessaires à la génération des données stochastiques de pluie. Finalement, l'indication de la présence d'une pente et d'un drainage agricole doit être mentionnée par l'usager si requis. Pour la végétation, particulièrement requise pour la simulation des fertilisants, l'information demandée est simple et se résume aux dates de début et fin de croissance, aux besoins en eau et azote des plantes, ainsi qu'aux profondeurs des racines en début et fin de saison.

Après avoir sélectionné le type de contaminant potentiel à étudier, l'information relative à ce contaminant doit être fournie. Pour un sel de déglçage, le taux d'application ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) ou la quantité et l'emprise touchée (incluant la route et la zone de soufflage de la neige) est demandé. Pour les pesticides et les hydrocarbures, différents paramètres sont demandés relatifs à l'adsorption de la molécule sur la phase solide du sol (coefficient de partition) et à la disparition des composés (biotransformation et dégradation). Pour de nombreux pesticides, les valeurs de paramètres requis sont déjà fournies. Pour les fertilisants, les principales informations requises sont les taux d'application des différents composés azotés. Toutes les valeurs de paramètres contrôlant le cycle de l'azote ont été rentrées par défaut dans EvaRisk pour les conditions du Québec. L'usager n'a donc pas besoin de déclarer ces valeurs qui sont difficiles à obtenir ou même à quantifier sur le terrain. De même que pour les pesticides, une banque de données internes regroupant déjà de très nombreux fertilisants standard est fournie.

Pour les résultats de sortie, EvaRisk permet la visualisation des résultats correspondant aux flux

lessivés, ruisselés et drainés, pour les différents contaminants étudiés. Les flux peuvent être représentés en termes de masse exportée ou de concentration. Les résultats sont fournis par incréments hebdomadaires.

## 3 MÉTHODOLOGIE

---

### 3.1 Présentation de la région à l'étude

L'évaluation ne pouvant être faite sur l'ensemble du territoire québécois, un terrain d'application représentatif a dû être choisi. Le terrain servant d'exemple est situé au nord du fleuve Saint-Laurent et contient les deux unités physiographiques les plus couramment rencontrées au Québec, soit les Basses-Terres du St-Laurent et le Bouclier canadien. Ce territoire correspond à la région environnante de Mirabel (figure 3.1).

Le territoire à l'étude est situé au nord-ouest de Montréal, plus précisément dans le comté de Deux-Montagnes. Il est limité par les longitudes 73°45' à 74°30' et par les latitudes 45°26' à 45°47'. Ce territoire renferme deux grandes unités physiographiques, soit les Basses-Terres du Saint-Laurent au sud, et le Bouclier canadien au nord. Les deux unités physiographiques sont séparées de façon naturelle par la faille de Lachute qui traverse la région d'est en ouest. Cette faille, qui suit la partie Est-Ouest de la rivière du Nord, est caractérisée par un escarpement de plusieurs dizaines de mètres. Le Bouclier canadien se distingue par un plateau plus ou moins accidenté dont l'altitude varie de 80 à 300 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer. Contrairement au Bouclier, les Basses-Terres du Saint-Laurent présentent une surface relativement uniforme dont l'altitude varie généralement de 40 à 80 mètres. Les seuls reliefs importants que l'on retrouve dans les Basses-Terres sont les collines d'Oka et les collines de Saint-André (roches intrusives et métamorphiques du Précambrien et du Crétacé). De plus, dans la région de Deux-Montagnes plusieurs basses arêtes de till s'élèvent au-dessus du niveau général de la plaine (Lajoie, 1960).

Les principaux cours d'eau rencontrés dans cette région sont au nombre de quatre. La rivière des Outaouais forme la limite sud du territoire; la rivière du Nord traverse la région d'Est en Ouest en longeant la faille de Lachute jusqu'à la ville de Lachute puis du Nord au Sud pour se jeter finalement dans la rivière des Outaouais; la rivière du Chêne suit parallèlement la route 148 et, finalement, la rivière Mascouche qui se situe à l'Est du territoire. Dans la partie Sud du territoire,

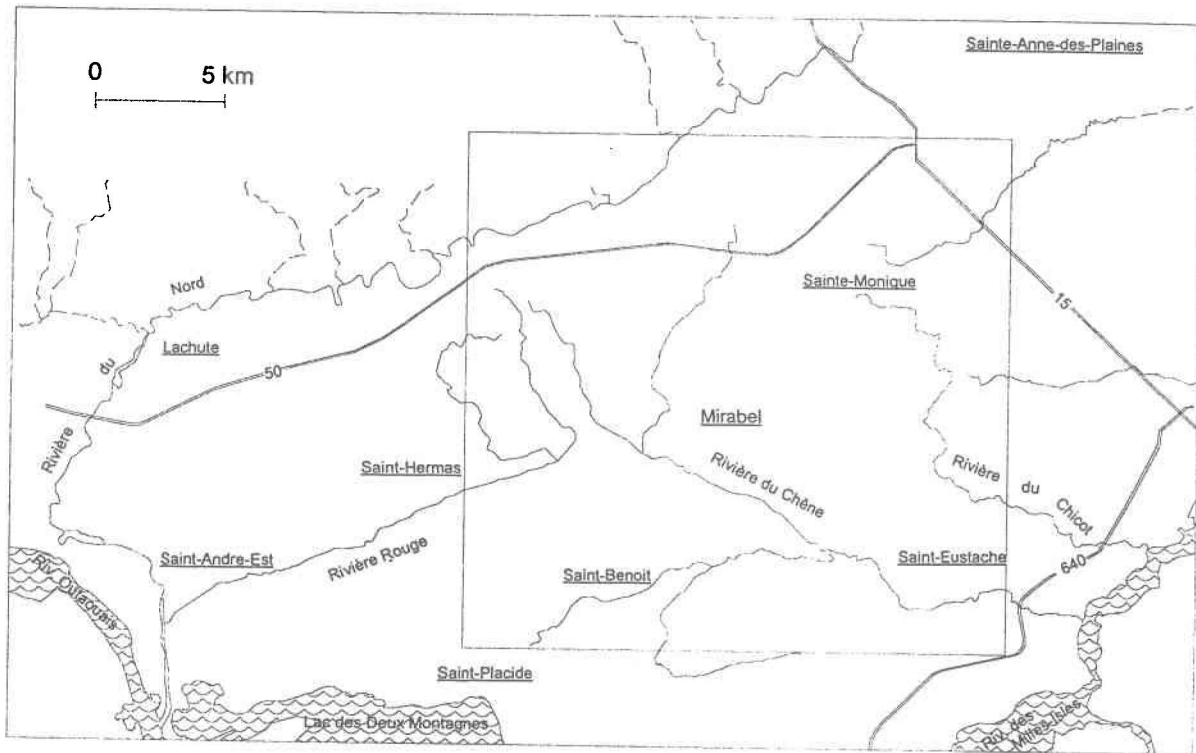


Figure 3.1 : Limite du territoire couvert dans la région à l'étude

le lac des Deux-Montagnes et le lac artificiel Dollard-des-Ormeaux, formé par le barrage de Carillon sur la rivière des Outaouais, constituent les principaux lacs des Basses-Terres. Quant au Bouclier, il renferme de nombreux lacs dont le lac Sir-John et le lac Clair.

Le secteur renferme quatre villes importantes, soit : Lachute, Oka, Mirabel et Saint-Jérôme. Ce territoire d'étude a une superficie de 2 645 km<sup>2</sup> et recouvre en tout ou en partie le territoire de cinq municipalités régionales de comté (MRC). La population regroupée de ces cinq MRC est de 299 750 habitants (en 1992), ce qui donne une densité de 114 habitants par kilomètre carré. Les cinq MRC à l'étude sont : Argenteuil, Deux-Montagnes, Rivière-du-Nord, Mirabel et Sainte-Thérèse de Blainville. De cette population, 175 829 habitants sont desservis par un réseau d'aqueduc alimenté par les eaux de surface, 28 530 habitants sont desservis par un réseau d'aqueduc alimenté par les eaux souterraines et 95 391 habitants sont desservis par un puits privé captant les eaux souterraines.

Pour l'étude, le territoire couvert se concentre sur les environs de la rivière Du Chêne soit, les municipalités de Ste-Scholastique, St-Benoit, St-Augustin et Deux-Montagnes. La rivière du Chêne draine la plus grande partie du comté de Deux-Montagnes. Sur son parcours on rencontre des sédiments de formation récente et des dépôts en cours de formation durant les inondations périodiques du printemps. Le territoire a une superficie d'environ 400 km<sup>2</sup>, entre les coordonnées latitudes 45° 32' 45" et 45° 43' 17" et longitudes 73° 55' 23" et 74° 11' 25". La zone d'étude comporte les deux unités physiographiques, soit les Basses-Terres et une petite partie du Bouclier canadien, au nord-ouest.



### 3.1.1 Contexte géologique

#### 3.1.1.1 Socle rocheux

##### - *Bouclier Canadien*

Selon Globensky, (1987) le substratum rocheux du Bouclier Canadien est constitué par les roches du Précambrien (Séries de Grenville et de Morin).

La Série de Grenville, la séquence la plus ancienne, consiste en roches métasédimentaires et métavolcaniques, composées principalement de calcaires cristallins, de quartzites et de gneiss à sillimanite et à grenat.

La Série de Morin consiste en syénite, en granite porphyrique, en monzonite quartzifère, en diorite à pyroxène, en anorthosite et en anorthosite gabbroïque. La colline de Saint-André-Est et les collines d'Oka sont constituées de roches appartenant surtout à la Série de Morin tandis que la partie Nord du secteur est formée des Séries de Morin et de Grenville.

##### - *Basses-Terres du Saint-Laurent*

Dans les limites de notre territoire d'étude, le substratum rocheux des Basses-Terres du Saint-Laurent est constitué par des roches en grande partie d'origine physico-chimique, inorganique et biochimique, déposées en eaux relativement profondes. Elles reposent en discordance sur le socle précambrien et sont disposées en strates horizontales qui ont été légèrement plissées et faillées lors de la mise en place des Appalaches (Ordovicien), à l'orogénèse taconique (Globensky, 1987). Ces roches sont :

### **3.1.1.1.1 Groupe de Beekmantown (Ordovicien)**

#### *- Formation de Beauharnois :*

la dolomie de Beauharnois se présente en couches massives homogènes ou en couches fortement laminées. Les premières contiennent des géodes ou vacuoles de calcite rose ou blanche et, par endroits, de gypse. La formation renferme dans sa partie basale des grains de quartz ainsi que de minces couches de calcaire cristallin. Cette formation contient, un peu partout des séparations argileuses, de véritables lits de shale surtout vers le sommet. Par endroits, des lits bréchiques peu importants viennent perturber la séquence. Ils sont, de toute évidence, reliés au processus de dolomitisation.

#### *- Formation de Thérèse :*

une inter stratification de dolomie et de grès. La dolomie est dense et homogène, gris moyen à gris-bleu et patine beige. Quant au grès, il est gris blanchâtre à gris rosé et finement grenu. Les contacts entre la dolomie et le grès sont nets. Vers la base, la dolomie devient plus arénacée et prend une teinte brunâtre.

### **3.1.1.1.2 Groupe de Potsdam (Cambrien)**

#### *- Formation de Cairnside :*

un grès quartzitique blanc à gris, à ciment siliceux, se présentant généralement en lits minces. Ce grès. Bien induré, est composé presque entièrement (95.5 à près de 100%) de grains de quartz, fins à moyens, bien arrondis. Par endroits, il

contient des impuretés minérales (feldspath ou minéraux lourds).

- *Formation de Covey Hill* :

un grès grossier arkosique qui n'affleure pas dans le secteur d'étude. Il est reconnu à partir de forages réalisés dans le pourtour des collines d'Oka.

Des roches intrusives alcalines du Crétacé, encastrées dans des roches du précambrien (Séries de Grenville et de Morin), se retrouve au sud dans la formation de Covey Hill. Selon Globensky (1982), cette intrusion est composée de carbonatites dont la couche superficielle contient de la goethite et de la limonite.

### 3.1.2 Contexte tectonique

Selon Globensky (1987), il existe deux systèmes de failles dans les Basses-Terres :

- 1) un système de failles normales associées au bouclier précambrien du côté NW des Basses-Terres (de la fin du Précambrien à la fin de l'Ordovicien). On observe deux directions principales pour ces failles normales :
  - a) un réseau majeur dirigé approximativement le long d'un axe NE-SW. Cette zone de failles longe le Bouclier Canadien (failles de Lachute, New-Glasgow, Sainte-Julienne,...). Ces failles résultent de réajustements dans la croûte terrestre. Elles démarrent dans le socle précambrien et affectent les roches sédimentaires sus-jacentes.
  - b) un réseau secondaire dirigé approximativement le long d'un axe E-W. Ces

failles (failles de Sainte-Anne-de-Bellevue, de l'île Bizard,...) sont probablement reliées à la mise en place des intrusions montérégiennes au Crétacé. Ces intrusions sont, à leur tour, probablement reliées à une zone de faiblesse de la croûte terrestre (Globensky, 1987).

- 2) un système de failles de chevauchement dans la moitié SE du bassin (failles d'Aston et du Foulon, ligne de Logan). Ce système a démarré durant l'orogénèse taconique, qui a débuté à l'Ordovicien. Ces failles sont situées en dehors du secteur d'étude; elles sont rappelées ici dans le but de comprendre la disposition en échelons, du nord-ouest (les Laurentides) au sud-est, des structures rencontrées dans le secteur d'étude, ainsi que de la forme synclinale de direction quasi-parallèle à la faille normale de Lachute et dans le coeur duquel s'écoule la Rivière Rouge (Rivière-Rouge). Le flanc sud de ce synclinal est faillé, c'est le cas de la faille N80°E et de la faille N65°E mises en évidence par études géophysiques.

La partie centrale des Basses-Terres du Saint-Laurent est souvent comparée à un demi-graben, c'est-à-dire, un bassin effondré entre des failles normales au NW et des failles de chevauchement au SE, ce qui le rapproche de la tectonique de certains sillons tectoniques précambriens africains associés à la tectonique du Rift Valley.

On peut distinguer, du Bouclier Canadien au NW jusqu'aux Appalaches au SE, quatre régions tectoniques suivantes: la zone de plate-forme (dont fait partie notre secteur d'étude), la zone externe, la zone interne et la zone à nappes. À l'intérieur de ces zones, les failles ont été activées de différentes façons et ont affecté différemment les roches des Basses-Terres. Dans la zone de plate-forme, par exemple, le réseau de failles NE-SW montre un patron en échelons bien défini s'enfonçant vers le SE à l'intérieur du bassin.

### **3.1.2.1 Dépôts meubles**

Les dépôts meubles du quaternaire, recouvrant le socle rocheux, sont constitués de dépôts alluvionnaires, marins, deltaïques, fluvio-glaciaires et glaciaires. Leurs épaisseurs varient de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, et ils se caractérisent par une grande hétérogénéité.

## **3.1.3 Contexte hydrogéologique**

### **3.1.3.1 Milieu aquifère**

Dans les limites du terrain d'étude, le secteur recouvre deux grandes unités physiographiques soit le Bouclier Canadien au nord et les Basses-Terres du Saint-Laurent au sud. Simard (1977), met en évidence deux unités hydrostratigraphiques (1Z et 2Z) représentant des milieux aquifères fracturés sous-jacents à des dépôts meubles.

Dans un contexte régional, l'unité hydrostratigraphique 2Z se compose des roches :

- ordoviciennes du Groupe de Trenton et de Black River constituées de calcaire, calcaire argileux, grès et schiste offrant un potentiel hydrogéologique moyen ;
- ordoviciennes du Groupe de Chazy constituées de calcaire cristallin, schiste, grès et dolomie offrant un bon potentiel hydrogéologique ;
- cambriennes du Groupe de Beekmantown constituées de dolomie et grès ayant un potentiel hydrogéologique élevé ;
- cambriennes du Groupe du Potsdam constituées de grès quartzeux et conglomérats ayant un très bon potentiel hydrogéologique.

Les roches du Bouclier Canadien constituent l'unité hydrostratigraphique 1Z et se composent principalement de roches granitiques et gneissiques peu perméables.

Enfin, signalons la présence des roches dévoniennes des intrusions montérégiennes constituées de gneiss de granite, d'anorthosite, de roches alcalines. Selon Simard (1977), ces roches auraient une très faible perméabilité.

### 3.1.3.2 Piézométrie régionale

La soustraction des surfaces représentative des élévations (m/IGQ) et des profondeurs de niveaux statiques (m), données extraites de la base DOGIREs, permet de dresser la surface piézométrique régionale.

Les crêtes piézométriques (où  $p_z \Rightarrow 70$  m/IGQ) coïncident également avec les sommets topographiques et les zones d'affleurements rocheux. Les rivières du Nord et Rouge drainent les eaux souterraines de chacun des bassins hydrogéographiques.

Le MEF (Ministère de l'Environnement et de la Faune) a suivi sur plusieurs années quelques piézomètres répartis dans les limites du secteur d'étude. Les fluctuations maximales enregistrées au cours de la période d'observation varient de 4,3 à 4,6 m dans les aires de recharges et de 1,28 à 2,27 ailleurs.

### 3.1.3.3 Paramètres hydrodynamiques

Selon Simard (1977), le débit moyen des puits de l'unité 2Z est de 15 m<sup>3</sup>/h avec une probabilité de 59 % d'obtenir des débits supérieurs à 9 m<sup>3</sup>/h et de 31 % d'obtenir des débits supérieurs à 27

m<sup>3</sup>/h. La profondeur moyenne est de 30,5 m avec 73 % des valeurs comprises entre 14,0 et 39,3. Le débit spécifique moyen est de 2,2 m<sup>3</sup>/h/m avec une probabilité de 80 % d'obtenir des valeurs comprises entre 1,7 et 5,8 m<sup>3</sup>/h/m. La transmissivité estimée est de  $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Toujours selon Simard (1977), le débit moyen des puits terminés dans l'unité 1Z est de 4,1 m<sup>3</sup>/h avec une probabilité de 30 % d'obtenir un débit supérieur à 9 m<sup>3</sup>/h. La profondeur moyenne est de 39 m avec 70 % des valeurs comprises entre 22 et 53 m. Le débit spécifique moyen de ces puits est 0,33 m<sup>3</sup>/h/m avec 68 % des valeurs comprises entre 0,23 et 0,37 m<sup>3</sup>/h/m. La transmissivité estimée est de  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Simard (1978) évalue que, sur l'ensemble du bassin hydrogéographique (rivière Rouge), 4,5 % des précipitations contribuent à recharger les nappes aquifères, et que les ressources en eau souterraine de cette région sont (souvent) vulnérables à la pollution et demandent à être protégées. Il estime que théoriquement les eaux souterraines de cette région peuvent alimenter en eau potable une population de 500 000 personnes représentant des prélèvements de 85 millions de mètres cubes par an. Le tiers de ces prélèvements proviendrait de la réalimentation induite ou artificielle des nappes alluviales et le reste des milieux fracturés.

## **3.2 Traitement des données**

### **3.2.1 L'image LANDSAT**

Pour cette étude, la cartographie de l'utilisation du sol a été acquise de la télédétection. L'image de télédétection représentant l'occupation du sol de notre territoire (figure 3.2) provient du capteur TM (Thematic Mapper) du satellite LANDSAT et a été prise le 23 août 1994.

L'image satellite, servant dans cette étude, nous a été fournie par MIR télédétection. Avant de fournir l'image classifiée, MIR télédétection a dû réaliser plusieurs étapes permettant d'arriver

à un résultat de classification fiable. La première étape a consisté au géocodage de l'image LANDSAT à l'aide de points d'appui cueillis sur les cartes topographiques à l'échelle 1:50 000. Les données ont été ramenées à 25 m de résolution en projection UTM, dans le système de référence géodésique nord-américain de 1983 (NAD83). Par la suite, les fiches d'enregistrement des producteurs, produites en format MicroStation (DGN), ont été converties dans un format compatible avec le système de traitement d'images et ont ensuite été superposées à l'image LANDSAT. La seconde étape a consisté à faire l'échantillonnage de chaque type de culture se retrouvant sur le territoire à l'étude. L'échantillonnage a consisté à prélever des aires d'entraînement sur l'image LANDSAT correspondant aux différents types d'occupation du sol. Ces aires d'entraînement servent au calcul des signatures spectrales de chaque type de culture.



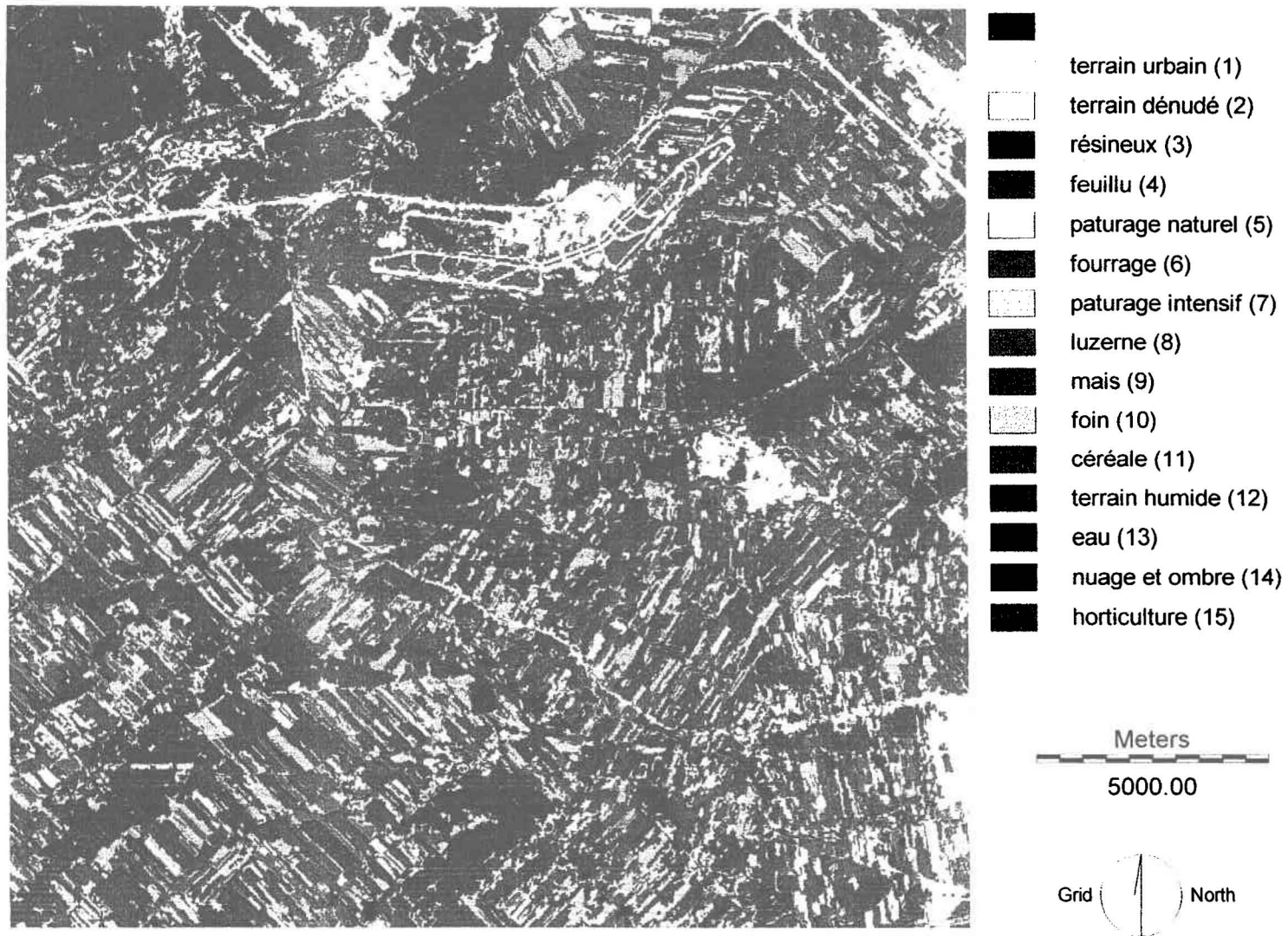


Figure 3.2 : Occupation du sol de la région de Mirabel obtenue par MIR Télédétection de l'image LANDSAT du 23 août 1994

Une signature spectrale correspond à une mesure quantitative des propriétés spectrales d'un objet dans une ou plusieurs bandes spectrales. Des aires d'entraînement ont été définies pour plusieurs sous-classes d'un même type d'occupation du sol lorsque des différences de teintes notables étaient perçues à l'intérieur de ce même type d'occupation du sol. Cette fragmentation en plusieurs sous-classes permet une meilleure différenciation ou séparabilité des signatures spectrales. Le calcul des signatures spectrales génère un portrait de chaque type d'occupation du sol échantillonné. Ces signatures permettent également d'évaluer la discrimination ou la séparabilité entre les différents types d'échantillons et d'anticiper la qualité des résultats d'une classification automatique de l'image LANDSAT.

La classification automatique de l'image a été réalisée à partir des signatures spectrales des sous-classes. La classification par maximum de vraisemblance a été retenue comme étant la méthode de classification produisant les meilleurs résultats (Cluis *et al.*, 1991; Bernier *et al.*, 1984a; Bernier *et al.*, 1984b). Ces sous-classes ont finalement été intégrées en classes pour la production de l'image finale de l'occupation du sol.

Deux autres types d'occupation du sol font également partie de la classification finale, soit les classes "villes" et "eau". Les zones urbaines ont été définies à cette étape-ci. Un polygone grossier couvrant approximativement les zones urbaines a tout d'abord été généré. L'intersection spatiale entre ce polygone et le type d'occupation du sol obtenue par classification pour les régions urbaines a par la suite été effectuée. L'emploi de cette méthode pour la définition des zones urbaines permet d'éviter que certaines cultures soient classifiées comme étant du sol urbain, par exemple les céréales, qui montraient de la confusion avec les routes. Cependant, les zones correspondant au type d'occupation du sol "eau" ont été définies par seuillage du canal TM 4.

Par la suite, l'image de l'occupation du sol a été filtrée afin d'améliorer la présentation visuelle

des résultats. Un filtre spécialement conçu pour ce type d'application a été appliqué à l'image. Le filtre permet d'éliminer les polygones formés par un regroupement de pixels d'une même classe plus petit qu'un nombre de pixel défini par l'utilisateur. Dans le cas présent, les polygones formés de moins de quatre pixels d'une même classe ont été remplacés par la valeur de la classe du polygone le plus près. Les résultats filtrés des sous-classes obtenus de la classification ont été intégrés en classes synthèses. Les sous-classes n'étant pas rattachées à des caractéristiques particulières connues du type de sol, leur conservation ne comportait aucun avantage. Cette intégration simplifie les résultats et facilite l'interprétation.

La légende de la carte comportait des données spécifiques ne correspondant pas à nos propres besoins. Nous avons donc conçu une nouvelle légende répondant d'avantage aux besoins de l'étude. Ceci est réalisé dans IDRISI à l'aide des fonctions EDIT et ASSIGN.

### **3.2.2 La carte pédologique**

La carte pédologique utilisée est celle de Lajoie, datant de 1960 et représentant le secteur d'Argenteuil. La carte étant sur format papier, elle a dû être numérisée afin de pouvoir l'intégrer dans le SIG. La numérisation s'est fait à l'aide du logiciel Atlas\*Draw (Strategic Locations Planning, 1988), logiciel qui est compatible avec Idrisi. Ce n'est qu'une partie du Comté d'Argenteuil qui a été numérisée, étant donnée la réduction du territoire pour les fins de cette étude (figure 3.3).

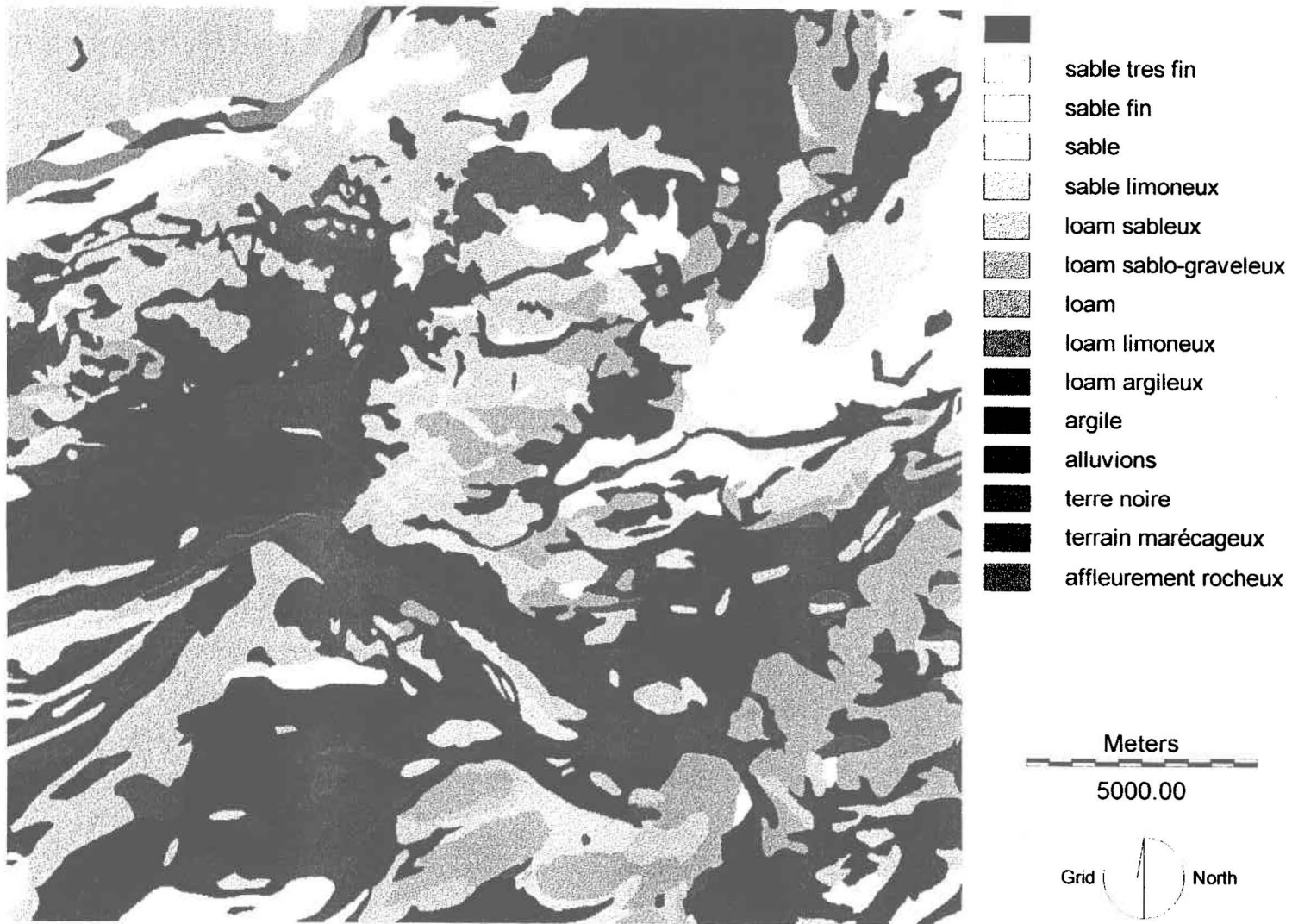


Figure 3.3 : Carte numérisée représentant les types de sol selon la carte pédologique de Lajoie (1960)

La carte numérisée à l'aide d'Atlas\*Draw a comme extension .ABF, cependant, afin de pouvoir l'afficher sur Idrisi, il faut la transformer en .BNA. Le tout s'est fait dans le logiciel Idrisi à l'aide de la fonction REFORMAT et CONVERT. Par la suite, il faut informer le SIG du type de projection utilisée. La carte pédologique était de type UTM NAD 27 (QC27TM18, pour Montréal). Nous avons ensuite fait les modifications nécessaires afin de transformer la carte pédologique pour qu'elle soit de la même projection que l'image satellite, soit NAD83. Il suffit d'utiliser dans Idrisi la fonction REFORMAT - PROJECT et de spécifier le nom de la carte à modifier, puis le nom de cette même carte modifiée, puis spécifier la projection voulu, soit UTM-18N.

Après avoir fait les conversions, on se doit d'initialiser l'image vectorielle afin de pouvoir par la suite la transformer en image matricielle (raster). Pour ce faire, on utilise les fonctions DATA ENTRY- INITIAL- dont la première option consiste à copier les paramètres spatiaux à partir d'une autre image. Après cette étape, il ne reste plus qu'à transformer la carte des sols en format matriciel pour qu'elle puisse être traitée de la même façon que la carte de l'occupation du sol, provenant de l'image satellite. Cette étape se fait à l'aide de la fonction REFORMAT - VECTER/RASTER - POLYRAS.

### **3.2.3 Intégration de l'occupation du sol et de la pédologie**

Les deux images ne couvrant pas la même superficie du territoire, il faut donc réduire le territoire afin que les deux images à traiter recouvrent exactement la même superficie. Pour ce faire, on utilise la fonction Window Display Region qui extrait une sous image à partir d'une image plus grande (fenêtre), qui peut alors être sauvegardée à l'aide de la fonction SAVE COMPOSITION. Une fois cette étape faite, il ne reste plus qu'à ouvrir la même fenêtre sur la carte représentant l'utilisation du sol par la fonction REFORMAT - WINDOW (with an existing windowed image). Cette étape permet d'avoir la même fenêtre sur les deux images, étant donné que le logiciel se fie

au nombre de colonnes et de lignes.

Comme pour l'image de l'utilisation du sol, la légende des types de sol a dû être modifiée avec la fonction EDIT pour la réduire aux 45 classes présentes dans le secteur à l'étude (voir tableau 7.1 en annexe). La carte a par la suite été reclassée à 14 classes au lieu de 45 en regroupant différentes classes afin de faciliter les étapes suivantes. Une nouvelle palette a alors été créée afin de représenter les nouvelles classes (figure 3.3).

### **3.2.4 Relation entre le type de sol et l'occupation du sol**

Afin de voir les relations entre le type de sol et le type d'occupation du sol, une carte de toutes les combinaisons possibles a été faite à l'aide de la fonction CROSSTAB. Sur cette carte on retrouve, pour chaque parcelle, le type de sol et l'occupation du sol, donnant 197 combinaisons possibles. Le très grand nombre de classes fait en sorte que la carte est difficile d'interprétation et nécessite une réduction du nombre de classes.

En ce qui concerne la carte de l'occupation du sol, une étape de réduction des classes de 15 à 10 a dû être effectuée afin de réduire les risques d'erreurs. La réduction de classes s'est faite par regroupement, donnant les classes : terrain urbain, forêt, foin et pâturage, luzerne, maïs, céréales, terrain humide, cours d'eau et étangs, nuage et ombre et horticulture. À la suite de cette réduction des classes d'occupation du sol, une seconde carte montrant les combinaisons possibles a été faite à l'aide de la fonction CROSSTAB. Le nombre de combinaisons (131) étant encore trop élevé, une seconde réduction de classes a été faite sur la carte d'occupation du sol. La carte d'occupation du sol a maintenant 6 classes soit, urbain, résineux, feuillus, agriculture, eau et nuage et ombre (figure 3.4).

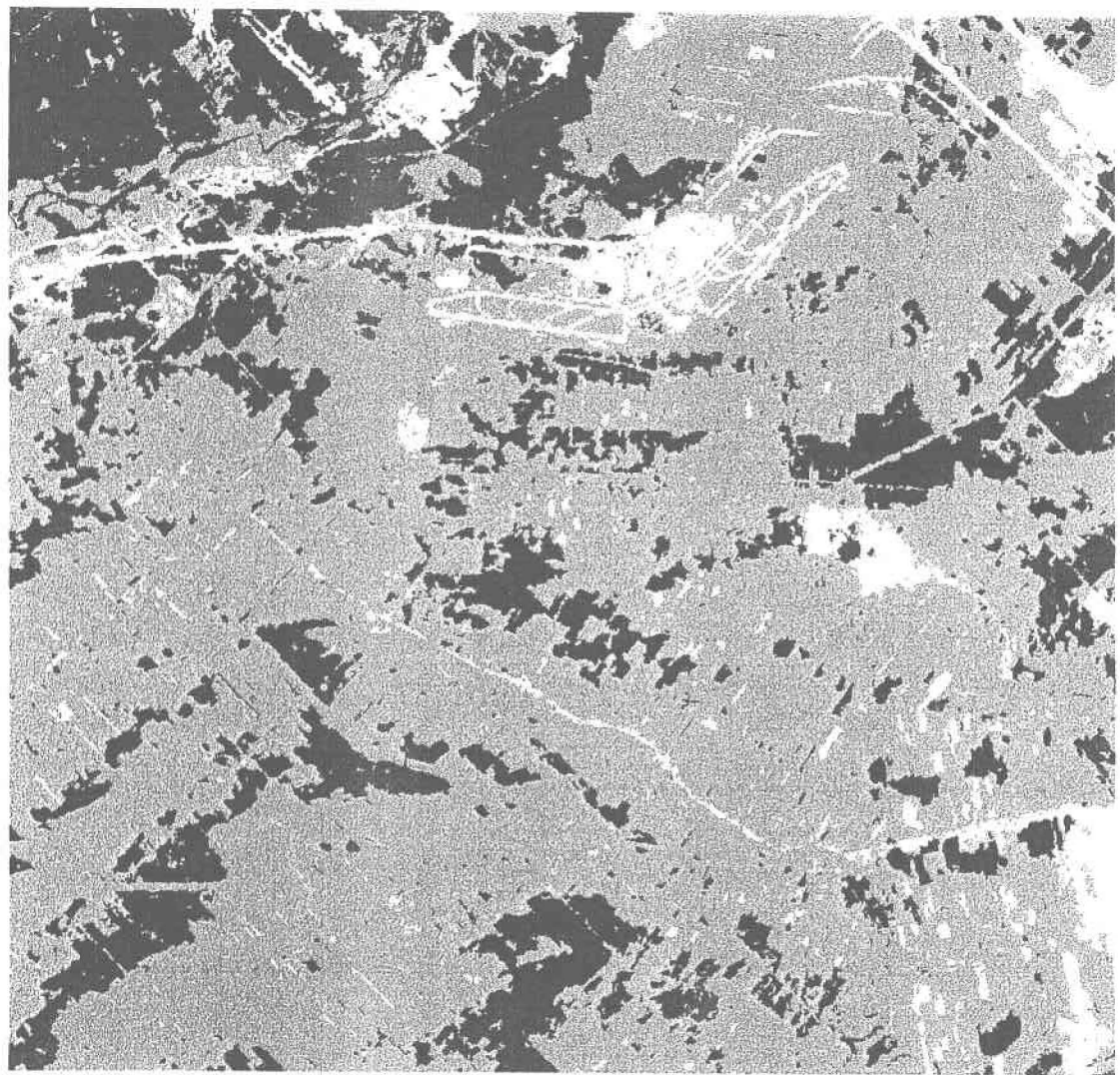
Les cultures ont été réunies étant donnée la rotation des cultures que font classiquement les agriculteurs dans cette région. En effet, un cycle de six à neuf ans a pu être défini par M.







Normand Bourgon, agronome du MAPAQ (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec) à Lachute, lors de l'étude de démonstration de l'applicabilité du logiciel EvaRisk dans un cadre régional ( Agéos et INRS-Eau,1997). Pour une parcelle donnée, la succession classique des cultures serait la suivante :

- une ou deux années de maïs,
- une ou deux années de céréales,
- une année d'établissement de foin ou de luzerne,
- trois à quatre années de production de foin ou de luzerne.

Ce cycle amène des traitements (nature et dosage) très différents en terme de pesticides et fertilisants azotés selon les années. De cette façon, les résultats obtenus sont donc généralisés pour plusieurs années plutôt que la carte ne soit valide que pour l'année en cours.

La carte des combinaisons de types de sol et d'occupation du sol est maintenant composée de 75 classes au lieu de la carte initiale qui en contenait 197.



-  terrain urbain
-  résineux
-  feuillu
-  agriculture
-  eau
-  nuage et ombre

Meters  
5000.00



Figure 3.4 : Occupation du sol après réduction de classes



### **3.3 Utilisation d'EvaRisk**

EvaRisk est le logiciel utilisé pour d'évaluer l'infiltration des contaminants dans le sol. Cependant, pour arriver à cette fin, plusieurs paramètres doivent être déclarés pour la simulation. Ces paramètres ont été acquis dans le cadre de l'étude régionale réalisée sur le territoire (Agéos et INRS-Eau, 1997).

#### **3.3.1 Couches de sol**

Les données sur les sols proviennent du document de Lajoie (1960), document ayant servi lors de l'entrée des données de la carte des types de sol dans Idrisi. Les couches y sont décrites selon une terminologie qui diffère quelque peu de celle d'EvaRisk. En effet, les termes "sable" et "argile" se retrouvent dans le logiciel et dans la documentation, alors que l'appellation "terre franche" de Lajoie (1960) serait le terme français du "loam" dans EvaRisk.

#### **3.3.2 Contenus en matière organique**

Les contenus en matière organique des différentes séries de sol se retrouvent en partie dans le document de Lajoie (1960), et en partie dans le document de Tabi *et al* (1990) sur les problèmes de dégradation des sols au Québec.

Dans le document de Lajoie (1960), plusieurs séries ont été soumises à des analyses de carbone organique total par la méthode de combustion à l'état humide, pour chacune de leurs couches. À partir des valeurs en carbone mesurées, on peut calculer le contenu en matière organique en assumant que 58% de la matière organique est constituée de carbone organique (Lajoie, 1960).

Le document de Tabi *et al.* (1990), présente les pourcentages de matière organique mesurés pour différentes séries de sol dans les couches correspondant respectivement à la couche travaillée par les instruments (pouvant atteindre 30 cm), à la couche immédiatement inférieure (jusqu'à 40 cm) et à la couche allant de 40 à 60 cm de profondeur.

### 3.3.3 Contenus en nitrates

Des valeurs de concentrations en nitrates du sol (kg/ha) ont été fixés pour chaque type d'activités agricoles présentes sur le territoire. Elle ont par la suite été validées par M. Marcel Giroux du centre de recherche sur les sols du MAPAQ, situé au complexe scientifique à Sainte-Foy. Ces valeurs sont fixées pour des couches de sol de 60 et de 100 cm. L'équivalence pour nos couches de sols qui sont d'épaisseurs variables a été faite en considérant que les concentrations en nitrate diminuent avec la profondeur approximativement selon une loi exponentielle inverse, soit  $y = \exp(-2x)$ . L'intégration de cette équation permet de déterminer la quantité de nitrate propre à chaque couche de façon simple. Pour chaque sol retrouvé sur le territoire, il devient donc possible de calculer les quantités de nitrates disponibles dans ses couches, selon le type d'activités culturales. Les valeurs attribuées aux sols des villes sont celles retrouvées dans les céréales, l'hypothèse étant faite que les pelouses bénéficient d'un apport en azote semblable à celui des céréales. Les concentrations du sol en nitrates pour les sols des feuillus et résineux proviennent d'une même source, soit de données calculées à l'aide du logiciel "Profile" qui s'appuie sur des mesures faites à la station forestière de Duchesnay, dans la région de Québec.

Pour le secteur agricole, des données sont disponibles pour le printemps et pour l'automne. Celles pour le printemps correspondent au moment du semis, soit habituellement à la mi-mai. Ces valeurs ne peuvent être attribuées aux sols au moment du dégel, car les quelques semaines qui suivent le dégel amènent une nitrification importante au niveau des sols agricoles qui, à tout le moins, double les concentrations en nitrates. Les concentrations à l'automne représentent les valeurs mesurées après la récolte, donc avant l'épandage de fertilisants organiques.

### 3.3.4 Contenus en ammonium

Les contenus en ammonium pour chaque couche sont fixés en relation avec les contenus en nitrates. Selon M. Marcel Giroux, le contenu d'un sol en ammonium serait d'environ 10% du contenu en nitrates pour un sol qui ne reçoit pas de fertilisation organique, et d'environ 20% pour

un sol qui en reçoit. Ces valeurs sont différentes pour la période du dégel au printemps. À cette période, les concentrations en ammonium peuvent égaler celles en nitrate s'il y a eu épandage de fertilisation organique tardif à l'automne. La situation se rétablira rapidement avec l'avancement de la saison. Fixer des valeurs pour la période de dégel serait donc hasardeux. Les données pour les feuillus et les résineux proviennent, comme dans le cas des nitrates, du logiciel "Profile", qui s'appuie sur des mesures faites à la station forestière de Duchesnay, dans la région de Québec.

### **3.3.5 Présence d'un drain**

Sur le territoire à l'étude, la présence des drains n'a pas été prise en considération.

### **3.3.6 Végétation**

#### **3.3.6.1 Début et fin de croissance**

La période de croissance des cultures a été estimée en considérant la semaine précédant la date du dernier gel printanier comme point de départ de la croissance et la date de la fin de l'évapotranspiration potentielle (essentielle à la croissance) comme point final. Selon des cartes provenant du bureau du MAPAQ de Lachute, le dernier gel printanier pour le territoire d'étude, pour les années 1965 à 1976, serait aux alentours du premier mai. Selon une autre carte, la longueur de la saison de croissance, soit le nombre de jours où la température moyenne est supérieure à 5 degrés Celcius, serait d'environ 197 jours. Selon cette dernière donnée, en partant du 23 avril, la saison de croissance irait jusqu'au 6 novembre, ce qui n'est pas compatible avec les données d'évapotranspiration potentielle. Les données d'évapotranspiration potentielle calculées par la méthode de Baier (Baier, 1972) pour les années 1941 à 1970 montrent un arrêt de l'évapotranspiration potentielle au 22 octobre pour l'aéroport de Dorval. On pourrait donc supposer que la saison de croissance s'étend du 23 avril au 22 octobre, soit une longueur de saison de croissance de 182 jours.

Pour le maïs, la saison de croissance irait du semis (14 mai) jusqu'à la récolte, soit tout près du

premier gel automnale (24 septembre). En ce qui concerne les céréales, ce serait de la mi-mai à la mi-août.

#### **3.3.6.2 Besoin en azote**

Les besoins en azote pour les différentes cultures se retrouvent dans le guide de fertilisation du CPVQ (1994). Dans le cas du foin, de la luzerne, ainsi que des pâturages intensifs, les besoins varieront entre l'année d'établissement et les années de production. Divers scénarios ont donc été conçus. Pour les zones urbaines, le besoin en azote a été fixé à 110 kg/ha, soit le même que pour le foin pour les années d'entretien.

#### **3.3.6.3 Besoin en eau**

Les besoins en eau ont été établis pour la plupart en relation avec les données d'évapotranspiration potentielle disponibles pour l'aéroport de Dorval pour les années 1941 à 1970. Dans le cas des cultures, l'utilisation de coefficients culturaux (Doorenbos *et al.* 1977; Doorenbos et Kassam, 1980) permet de déterminer les besoins en eau des cultures. Cinq classes ne possèdent pas en tant que tel de coefficients. Il s'agit des classes de feuillus, résineux, horticulture, villes et terrain humide. Pour les terrains humides on peut suggérer des besoins en eau identiques à l'évapotranspiration potentielle, tout comme les villes. Pour les feuillus et résineux, des valeurs ont été déterminées en considérant les évapotranspirations potentielles calculées par le modèle de simulation du cycle hydrique FORHYM pour la station forestière expérimentale de Duchesnay (Duchesne *et al.* 1996). Ces valeurs qui sont de 420 mm pour les conifères et de 433 mm pour les feuillus, ont été majorées de 10% afin de tenir compte de la différence des valeurs d'évapotranspiration potentielle pour les régions de Mirabel et de Québec, tel qu'illustré par Rochette (1988).

#### **3.3.6.4 Profondeurs des racines**

La profondeur des racines variera selon la quantité et la distribution de l'eau dans le sol et selon les caractéristiques physiques du sol. Dans le cas des arbres, des données recueillies sur des parcelles du réseau de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF) de la direction de la recherche forestière du ministère des Ressources Naturelles, ont permis d'établir ces valeurs à 45 cm pour les feuillus et à 40 cm pour les résineux. Pour les céréales, en consultant Krogman et Hobbs (1978), Weaver (1926), Doorenbos et al.(1977) et Nye et Tinker (1977), on peut supposer une profondeur de racines de 1,4m ou un peu moins. Pour le maïs, un mètre pourrait être jugé représentatif. Dans le cas de la luzerne, on peut selon Weaver (1926) considérer 120 cm après la première année de croissance et 180 cm pour les autres années. Pour le foin et les pâturages, Krogman et Hobbs (1978) et Doorenbos et al.(1977) laissent croire qu'un mètre serait représentatif. Toutefois, la profondeur utile des racines, c'est-à-dire la profondeur maximale à laquelle la végétation tirera l'essentiel de l'eau qu'elle utilise, n'excèdera pas 50 cm, tel que mentionné par Krogman et Hobbs (1978). Le logiciel EvaRisk distribuant le prélèvement sur la profondeur des racines et attribuant les besoins en eau entre les couches (maximum 8), il serait alors plus conservateur de considérer une profondeur maximale de 50 cm.

#### **3.3.6.5 Les pesticides**

En ce qui concerne les pesticides, M Richard Desrosiers du MEF à Québec a fourni les principaux éléments actifs utilisés. À Lachute, M. Normand Bourgon, agronome du MAPAQ, a pu identifier les plus employés sur le territoire. Les doses recommandées seraient celles du CPVQ (1994), sauf pour le glyphosate que l'on utiliserait en plus grande quantité. Le cycle de rotation des cultures dicte l'utilisation de pesticides. Du fait de l'importance de la culture du maïs dans la région et de la problématique particulière de l'atrazine utilisé comme désherbant dans cette culture, seul ce pesticide sera appliqué et étudié dans ce présent projet.

### **3.3.6.6 Les fertilisants**

#### **3.3.6.6.1 Organiques**

Les fertilisants organiques apportés aux cultures ont été définis par M. Normand Bourgon. Pour notre territoire, nous retrouvons principalement du fumier et du lisier de bovin. Le fumier est avec résidus de paille, excepté pour les pâturages où il est pâteux. Toujours selon M. Bourgon, le lisier serait surtout appliqué sur la luzerne et le foin, alors que le fumier serait appliqué dans le maïs, les céréales et les pâturages, bien que les deux s'appliquent dans toutes ces cultures. Les épandages se feraient principalement à l'automne, peu importe le type de cultures. Les quantités appliquées ont été fixées en fonction de la culture de l'année suivante. On applique habituellement de 25 à 30 tonnes/ha, sauf si du maïs est semé l'année suivante. On applique alors de 35 à 50 tonnes/ha. Les épandages se font en priorité dans les champs de maïs, étant donné que les besoins sont maximaux pour cette culture. Les pourcentages de champs traités ont été avancés par M. Bourgon selon ses impressions, aucune donnée précise n'étant disponible. Ils seraient de 50% pour le maïs, de 30 à 40% pour les céréales, de 10 à 20% pour la luzerne et le foin, et de 10% ou moins pour les pâturages, les animaux amenant déjà un bon apport en fertilisants. Les doses appliquées peuvent être moindres que celles suggérées, dépendant des quantités de fumier et de lisier disponibles et de la façon dont l'agriculteur les utilise.

Selon M. Bourgon, on peut considérer pour les pâturages une vache/ha, produisant 52 litres de rejets par jour. Sur 150 jours de pâturage possibles, les vaches y passeraient de la moitié aux deux tiers du temps. Selon le guide du CPVQ sur la culture du maïs (CPVQ,1984). On peut considérer 75% de ces 52 litres comme solide et 25% comme liquide.

#### **3.3.6.6.2 Chimiques**

Le logiciel EvaRisk ne tenant pas compte des apports de P et de K, seul le N apporté est pris en considération. Selon M. Michel Savoie du MAPAQ à Lachute, l'urée est préférée aux nitrates d'ammonium dans les grandes cultures, sauf pour le maïs. Les quantités de fertilisants chimiques

appliquées sont diminuées si des fertilisants organiques sont apportés au sol. Des corrections en azote doivent aussi être apportées s'il y a eu enfouissement de légumineuses à l'automne précédent (luzerne), selon le guide de fertilisation du CPVQ (1994). Selon M. Bourgon, la correction apportée serait de 50 à 60 kg/ha. Pour le fumier et le lisier, les corrections à établir pour chacun des éléments (NPK) se retrouve dans le guide "Recommandations pour les grandes cultures 1995-1996" du gouvernement ontarien (MAAO,1995-96).

La fertilisation chimique est fixée en considérant le guide de fertilisation du CPVQ (1994), en tenant compte de l'entretien avec M. Bourgon, selon qui certaines valeurs théoriques subissent un traitement différent dans la pratique.

### **3.4 Cartographie de la vulnérabilité**

Une étude, sur le même territoire, a mis en application le logiciel EvaRisk (Agéos et INRS-Eau, 1997). Plusieurs données sont donc reprises de cette étude représentant l'infiltration d'eau, de nitrates et d'atrazine à un mètre sous la surface. Les données de ces simulations ont été transposées dans une base de données créée dans Idrisi (voir tableau 7.2 en annexe) et ensuite liées à la carte obtenue précédemment avec Idrisi. Cette carte représentait les 73 combinaisons de type de sol et d'occupation du sol que l'on pouvait retrouver sur le territoire. Pour les résineux et les feuillus, seules les données sur l'eau sont utilisées étant donné qu'il n'y a pas d'épandages de pesticides et fertilisants dans les forêts. La catégorie eau et la catégorie nuage et ombre ne sont bien entendu pas simulées avec EvaRisk.

La base de données que l'on retrouve dans Idrisi permet d'associer les données d'une colonne à une carte du même territoire qui comporte le même nombre de catégories dans la légende, ce qui était le cas pour notre carte représentant les combinaisons de types de sols et les types d'occupation du sol.

Dans la base de données, on retrouve donc les données concernant l'eau, l'azote et l'atrazine. Pour chacun de ces paramètres on retrouve la quantité moyenne par année et la quantité maximale annuelle. Une carte a été faite pour chacun de ces six paramètres à l'aide de la fonction LINK-ASSIGN FIELD VALUES TO IMAGE. Il suffit de spécifier le paramètre que l'on veut représenter, en prenant soin de vérifier si la colonne ID-IDRIS est définie comme premier paramètre. On se retrouve donc avec six cartes.

Les valeurs retrouvées dans la légende des cartes de sortie sont interpolées entre les valeurs minimale et maximale, ce qui implique que les couleurs retrouvées dans la légende ne sont pas représentatives des valeurs de la carte. Cette interpolation se fait automatiquement dans Idrisi lors que les cartes sont le résultat de calculs. C'est pourquoi une reclassification a été faite pour chacune des six cartes afin que les valeurs représentées dans la légende soient les mêmes que celles retrouvées sur la carte. Ces cartes sont faites pour une représentation cartographique et ne pourront pas être utilisées lors d'étapes de calcul subséquentes.

Les données sont des masses et des volumes. Cependant, pour une représentation cartographique ce sont généralement des données de concentration qui sont représentées. Ainsi, la carte contenant les données sur la quantité moyenne d'azote (kg/ha) a été divisée par la carte des quantités moyennes d'eau (m), puis le résultat a été divisé par 10 afin d'obtenir des concentrations en mg/l. Une carte masque a été créée à partir de la carte des quantités moyennes d'eau, mettant la valeur de 0 aux valeurs ayant initialement 0 et le chiffre 1 à toutes les autres valeurs (fonction RECLASS). Par la suite, cette carte a été multipliée avec carte précédente en utilisant la calculatrice de Idrisi (image calculator).

Cette étape a permis d'obtenir la carte des concentrations moyennes d'azote en mg/l (figure 3.5). La même étape a été faite pour les trois autres catégories soit la quantité moyenne d'atrazine (figure 3.6), la quantité maximale d'azote et celle d'atrazine. Pour ces deux dernières cartes



(concentrations maximales de nitrates (figure 3.7) et d'atrazine (figure 3.8)), les valeurs des quantités maximales d'eau infiltrée ont été utilisées, au lieu des quantités moyennes, utilisées pour les deux autres cartes. Une reclassification de ces cartes a ensuite été faite afin de faire ressortir les zones où les concentrations sont les plus élevées. En ce qui concerne l'azote, les concentrations acceptées pour les eaux d'alimentation sont celles qui sont en dessous de 10 mg/l, alors qu'en ce qui concerne l'atrazine la concentration maximale acceptée est de  $3\mu\text{g/l}$ . Les valeurs en dessous de cette concentration ont comme valeur 0 et les autres y sont représentées en différentes classes.

Afin d'améliorer l'évaluation de la vulnérabilité en profondeur, nous avons pris en compte l'épaisseur d'argile. En effet, les cartes précédentes ne représentaient que les quantités infiltrées à un mètre sous la surface, mais une grande partie de ces contaminants ne se rendront pas à la nappe d'eau souterraine, étant freinés par une couche imperméable, soit l'argile. C'est pourquoi, une carte des épaisseurs d'argile a été superposée aux cartes de concentrations moyennes de nitrates et d'atrazine, ainsi que la carte d'infiltration moyenne d'eau (figures 3.5, 3.6 et 3.9), masquant ainsi les zones où l'argile est en quantité jugée suffisante pour freiner le contaminant (figures 3.10, 3.11 et 3.12). Les zones en noires représentent les endroits où le risque d'infiltration du contaminant jusqu'à l'eau souterraine est pratiquement nul dû au fait que l'argile a une épaisseur d'au moins 5 mètres.

D'autres systèmes de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution existent, tel DRASTIC, mais ces systèmes sont moins bien adaptés que les modèles mathématiques tel EvaRisk. En effet, DRASTIC ne tient pas compte du type de contaminant et ne donne qu'une évaluation très générale de la vulnérabilité du territoire, alors que des modèles spécialisés comme EvaRisk demandent plus de précision au départ mais permettent d'en savoir plus sur la vulnérabilité selon les caractéristiques propres des contaminants étudiés. Une application de la méthode DRASTIC a déjà été faite sur le même territoire (figures 3.13 et 3.14)(Duchaine, 1995).

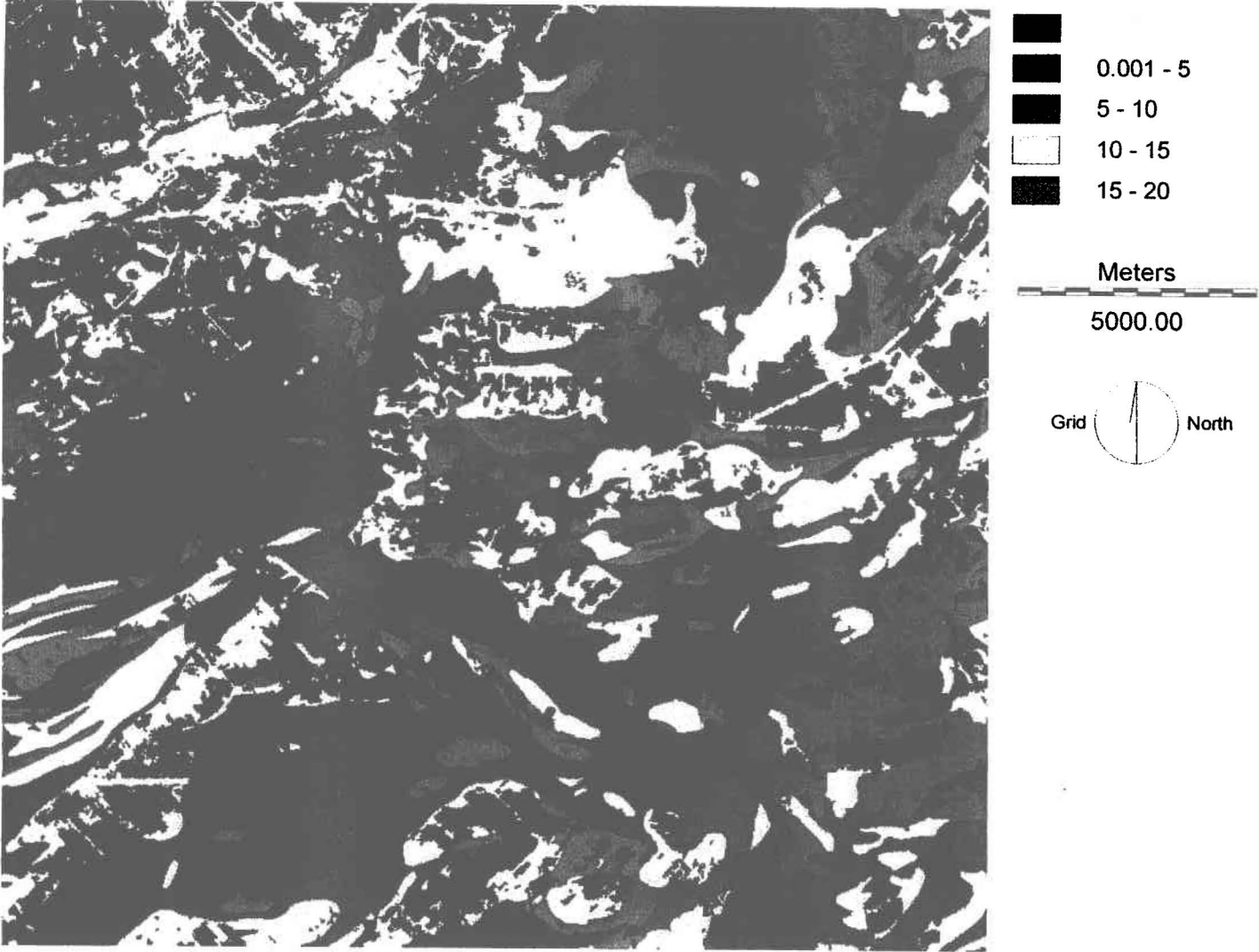


Figure 3.5 : Concentrations moyennes de nitrates en mg/l

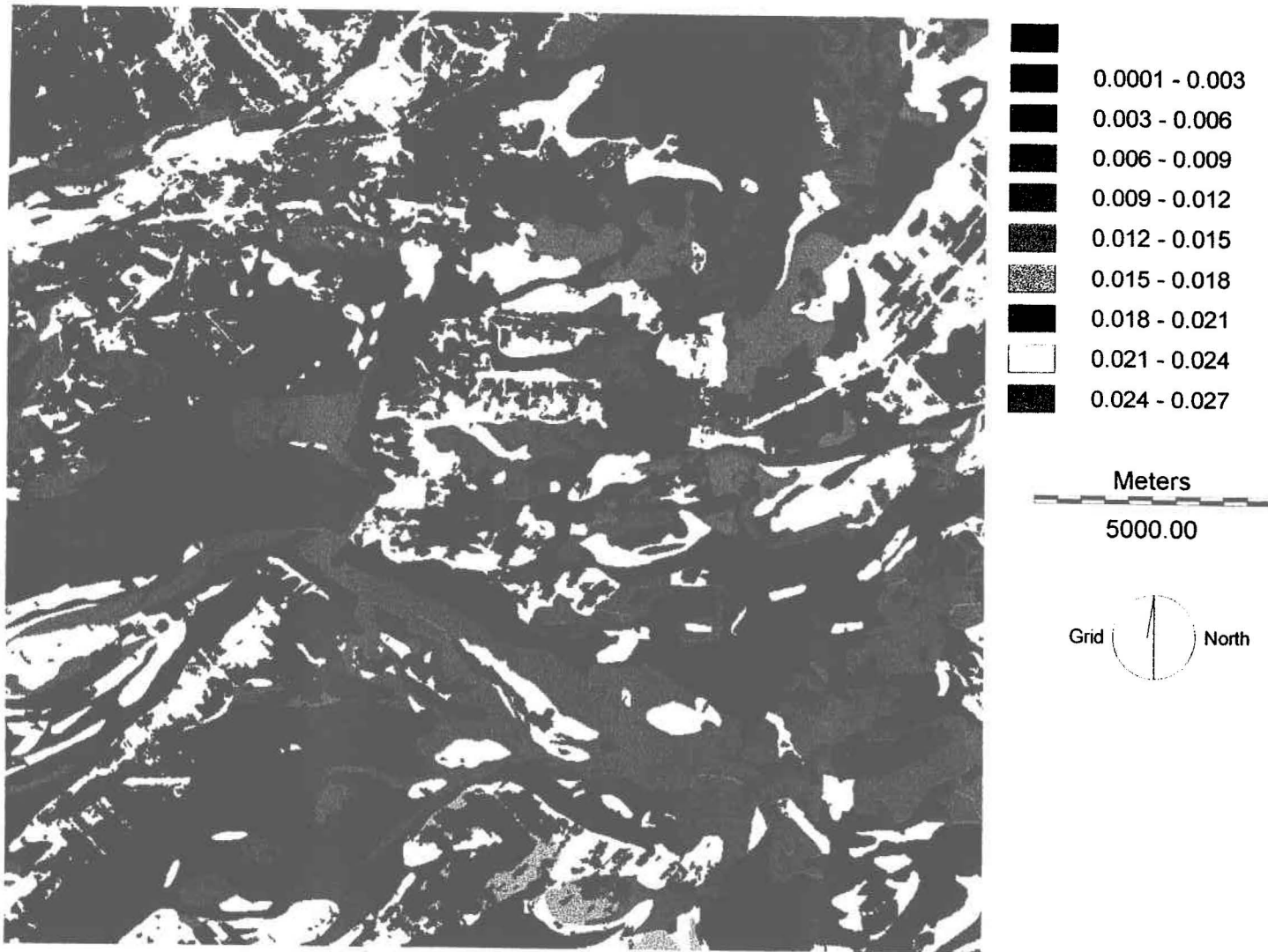


Figure 3.6 : Concentrations moyennes d'atrazine en mg/l

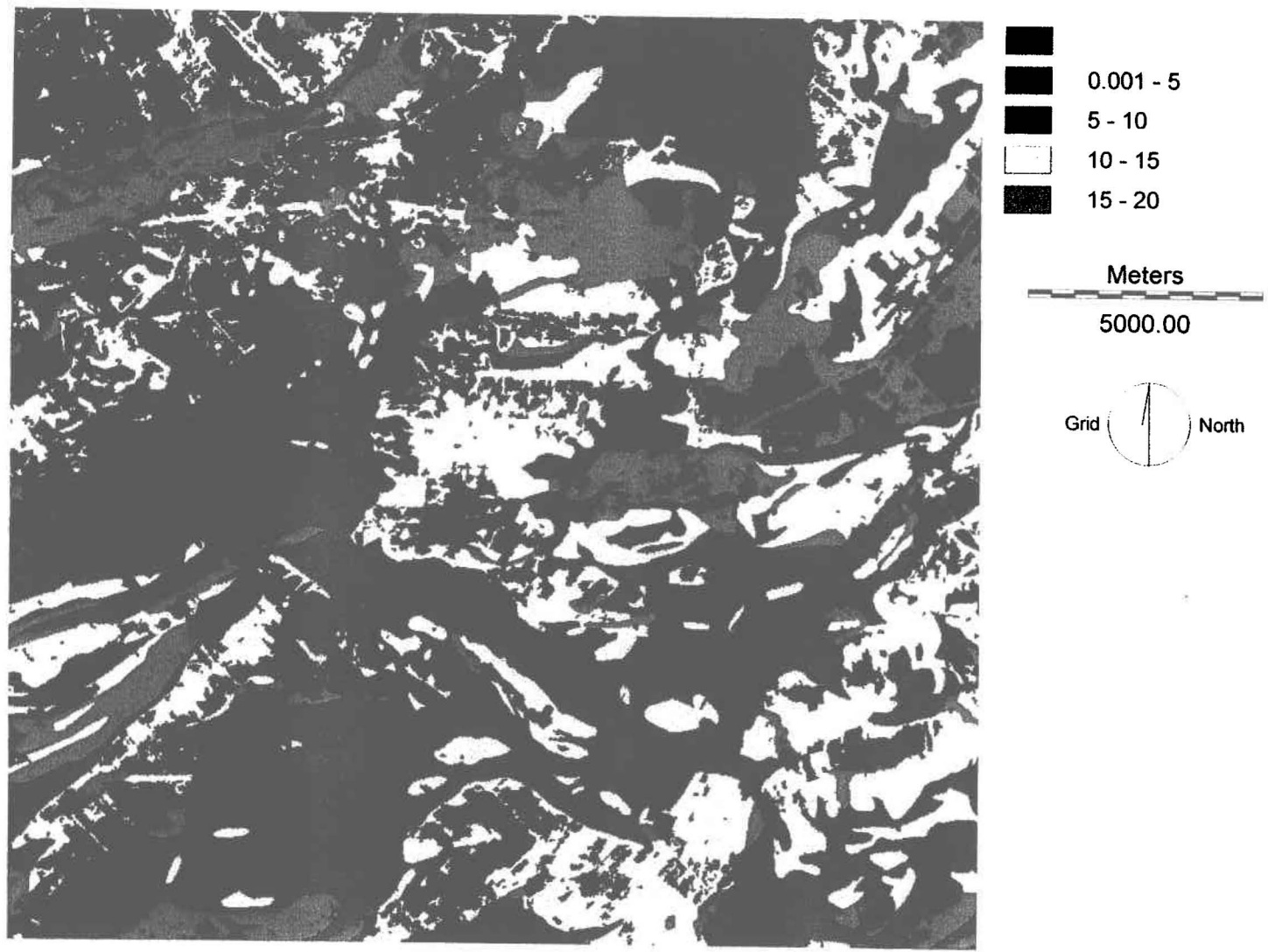


Figure 3.7 : Concentrations maximales de nitrates en mg/l

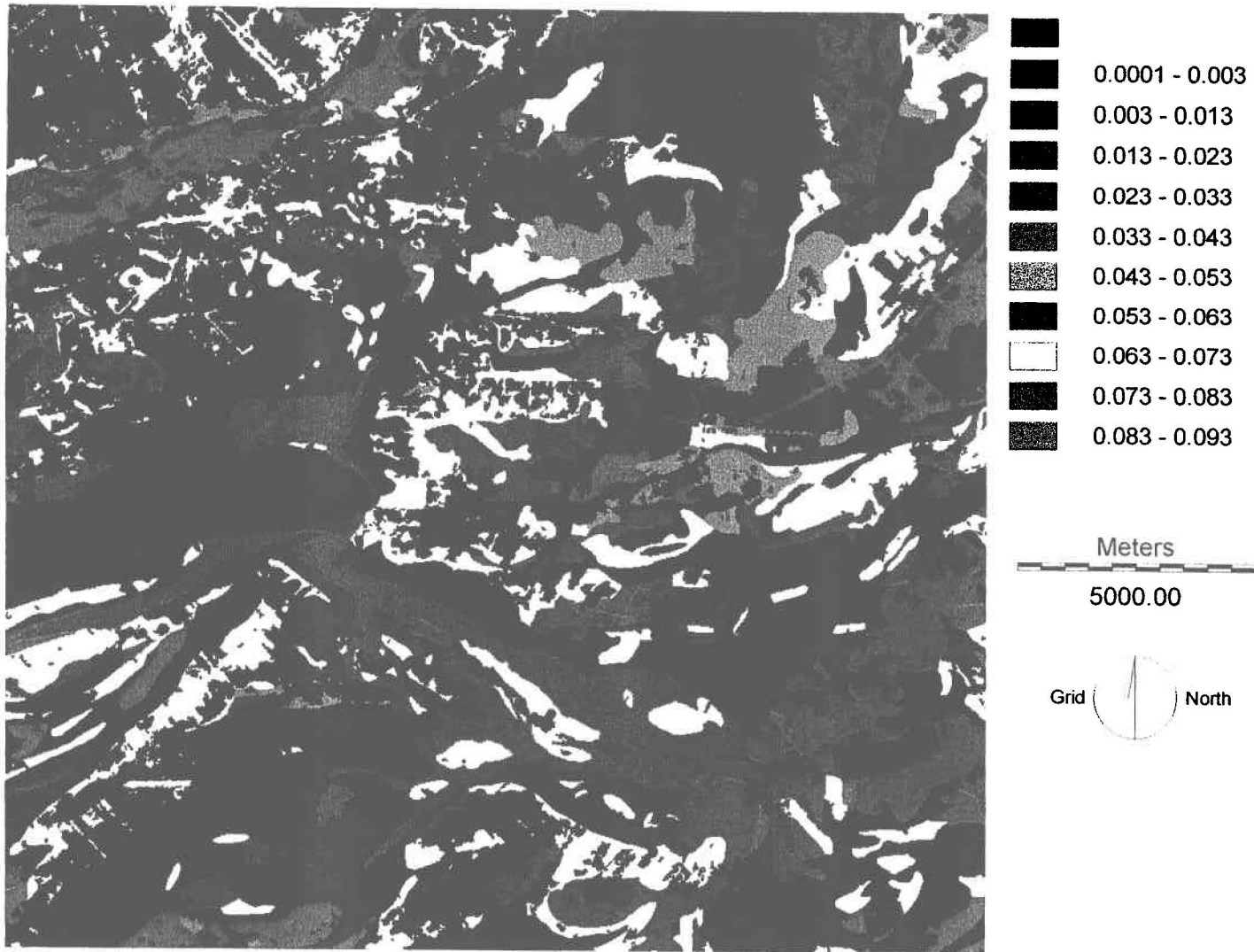


Figure 3.8 : Concentrations maximales d'atrazine en mg/l

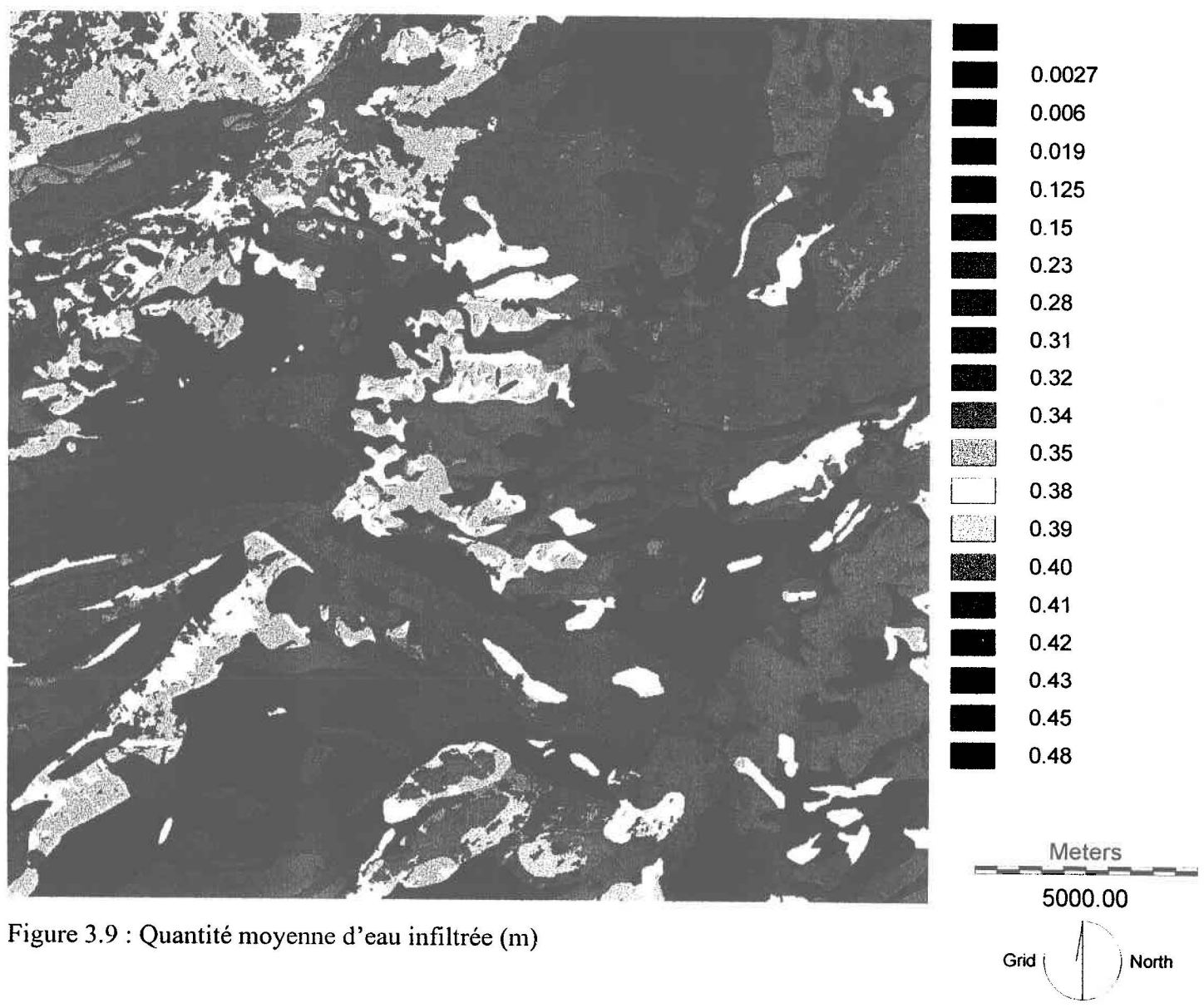


Figure 3.9 : Quantité moyenne d'eau infiltrée (m)

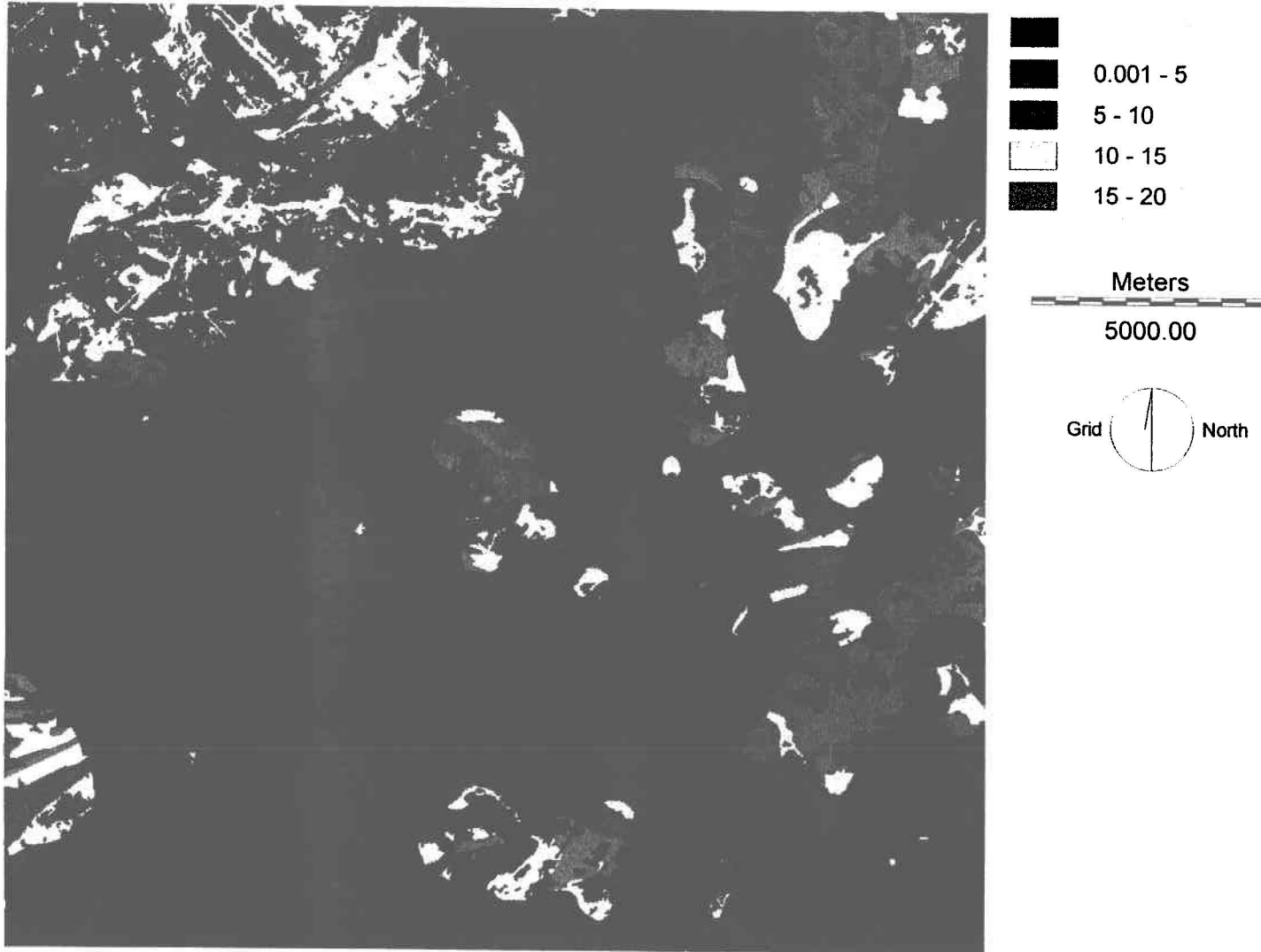


Figure 3.10 : Concentrations moyennes de nitrates (mg/l) avec le masque d'argile

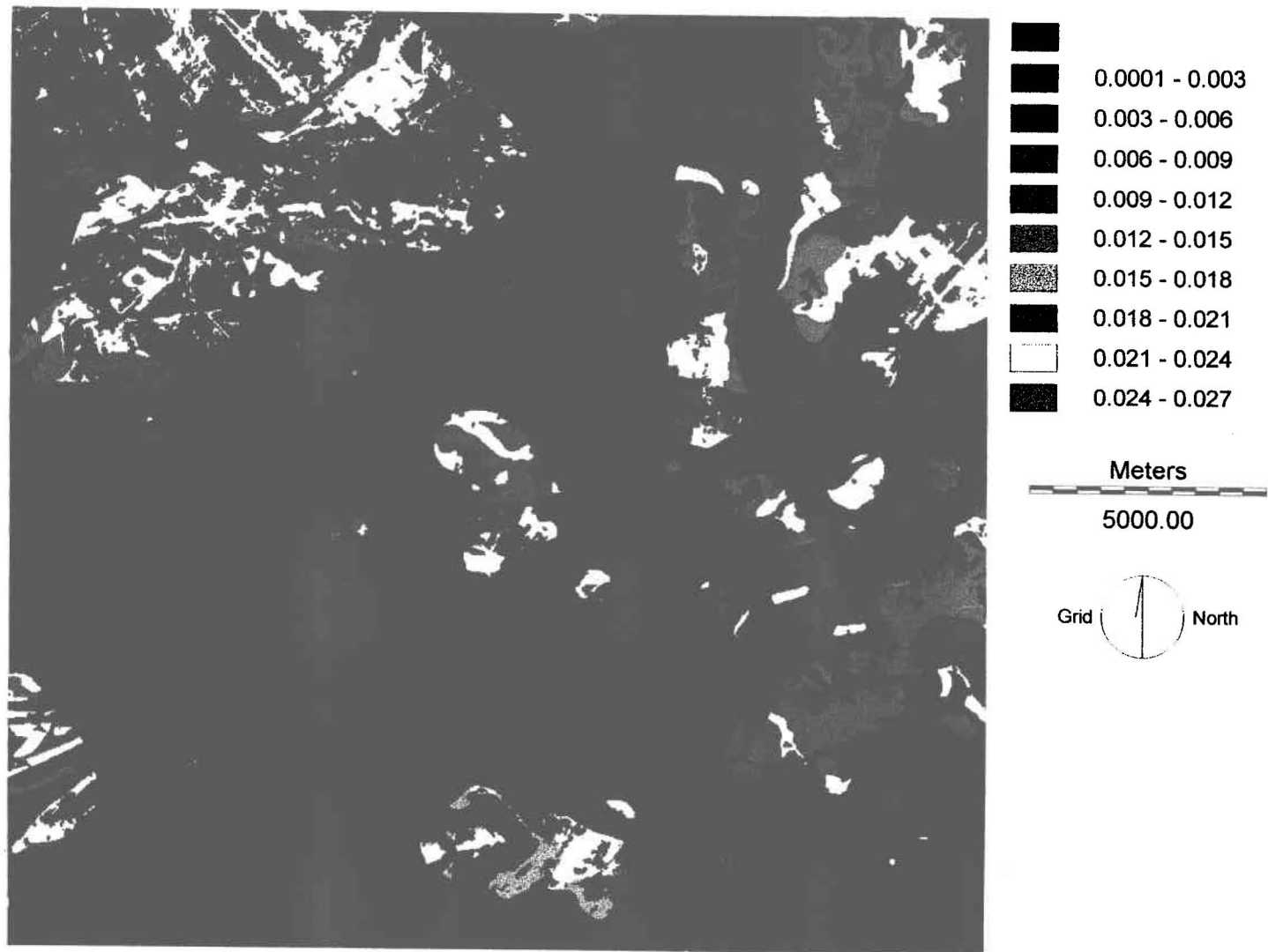


Figure 3.11 : Concentrations moyennes d'atrazine (mg/l) avec le masque d'argile



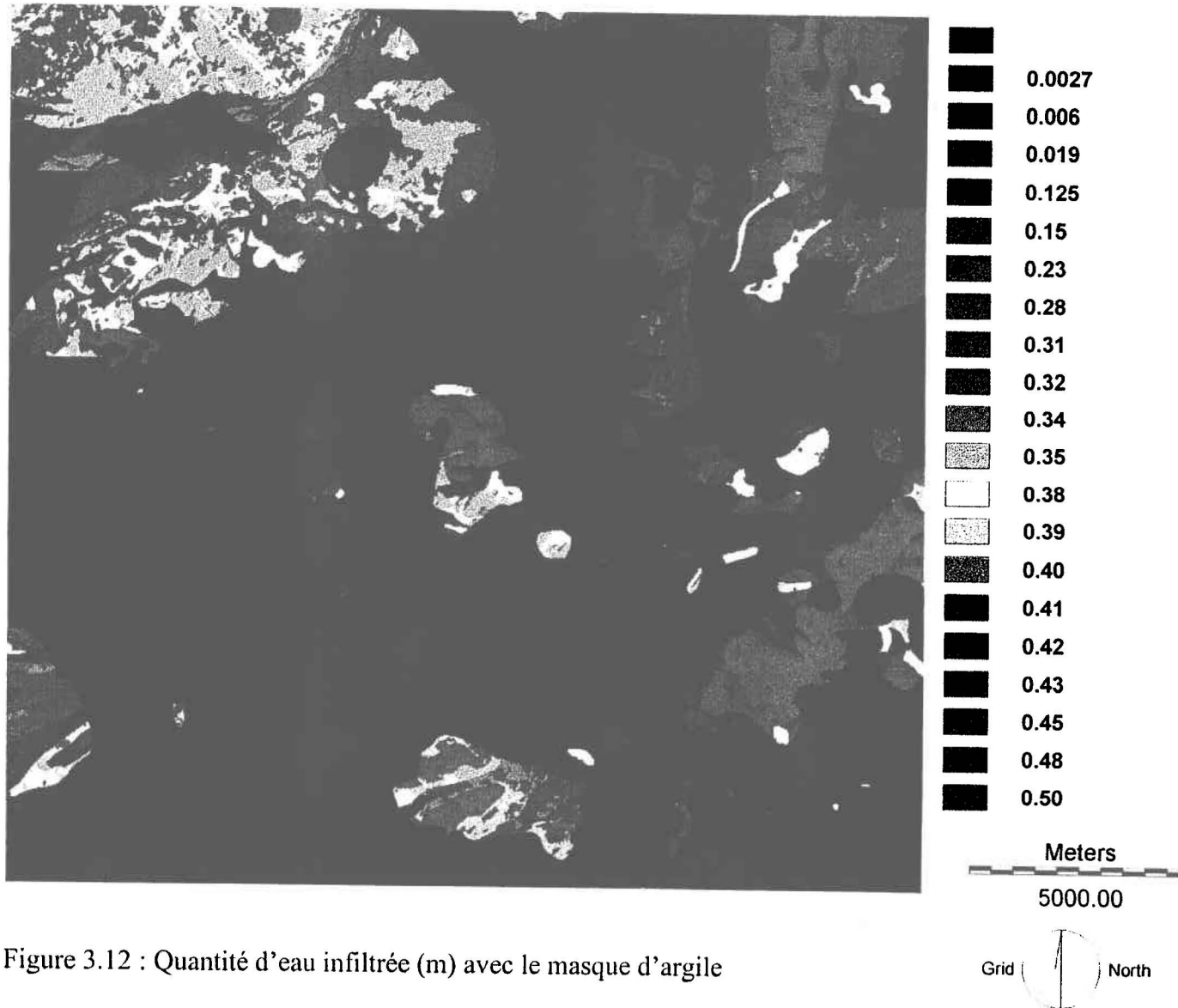


Figure 3.12 : Quantité d'eau infiltrée (m) avec le masque d'argile

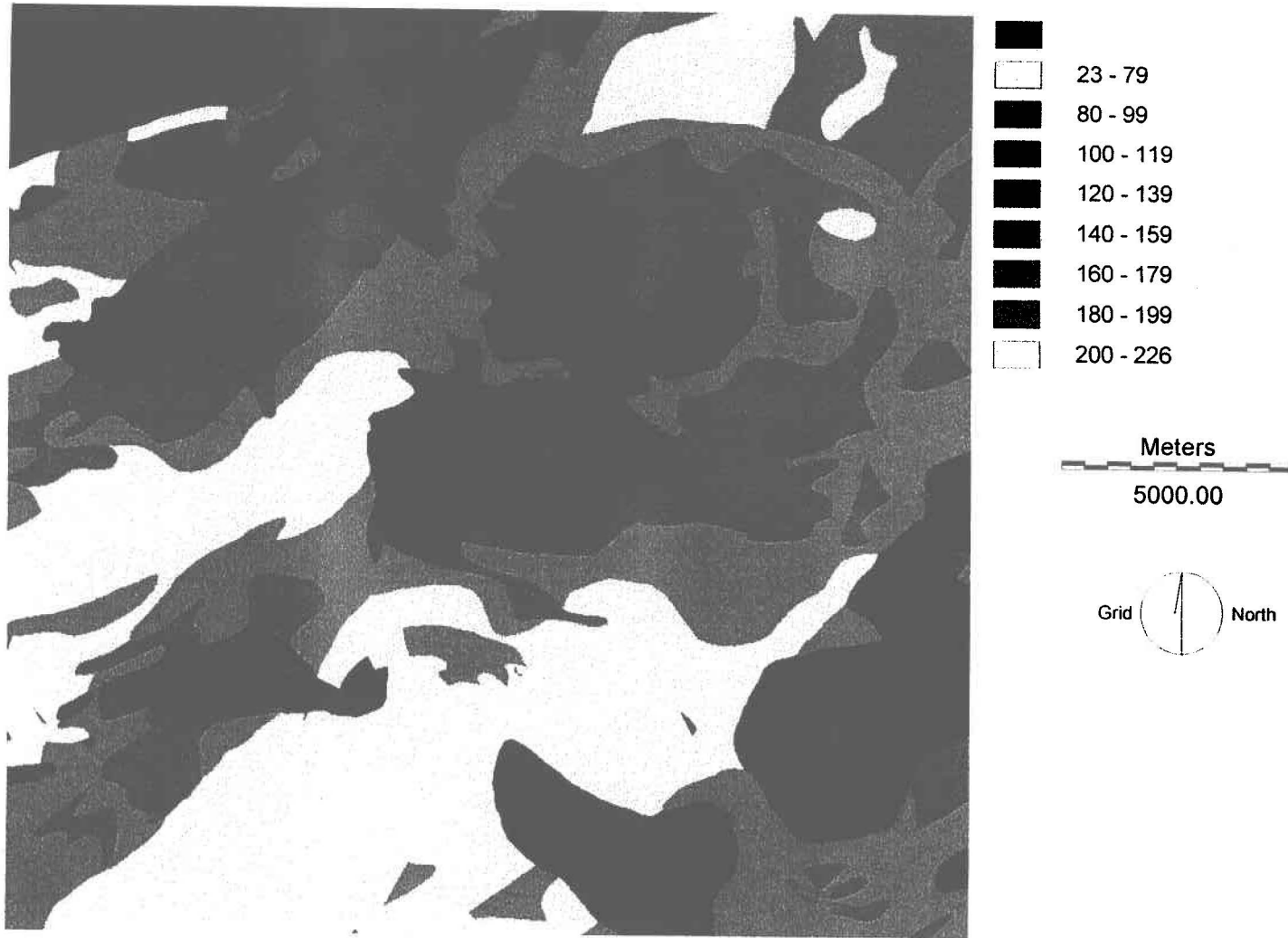


Figure 3.13 : Indice de vulnérabilité DRASTIC (nappe captive)

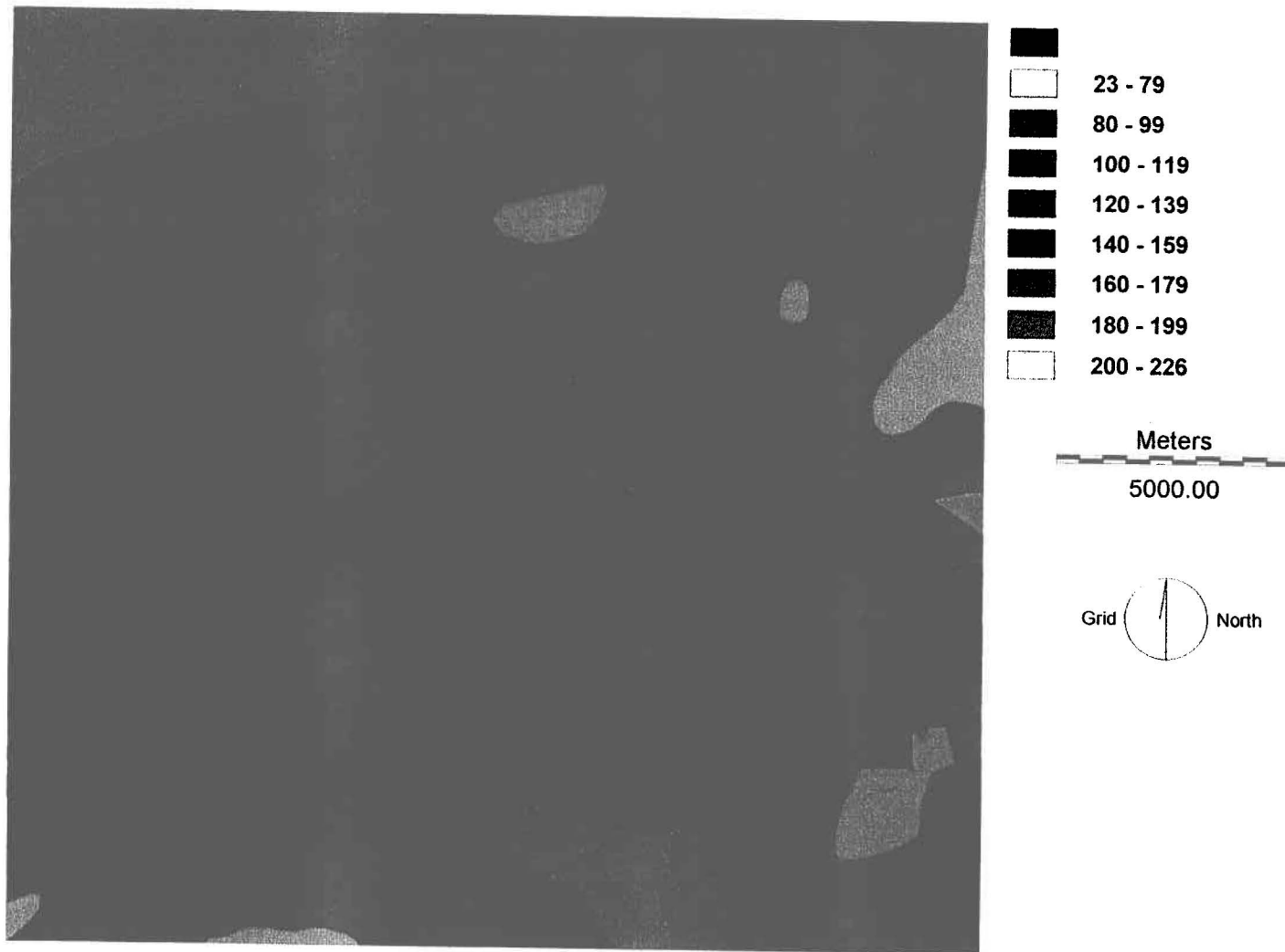


Figure 3.14 : Indice de vulnérabilité DRASTIC (nappe libre)

## 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

---

### 4.1 Résultats

Nous avons donc obtenu quatre cartes (figures 3.5 à 3.8) portant sur les concentrations moyennes en nitrates (3.5) et en atrazine (3.6), et sur leurs concentrations maximales (3.7 et 3.8). On remarque d'abord que les endroits où les concentrations infiltrées à un mètre sous la surface sont les plus élevées en nitrates présentent la même tendance pour les concentrations en atrazine. Ceci est dû au fait que le type de sol a une grande importance dans l'infiltration d'un contaminant ou de toute autre substance.

En effet, le sable favorise grandement l'infiltration alors que l'argile, quant à elle, ne la favorise pas. Le sable a une forte perméabilité due à la grosseur de ses particules variant entre 2mm et 50  $\mu\text{m}$  et induisant des pores interparticulaires de même grandeur. L'argile, quant à elle, présente des particules de taille beaucoup plus réduite, inférieures à 2  $\mu\text{m}$ , ce qui implique que les liquides ont tendance à être retenus à la surface des solides au lieu de simplement s'y écouler. La vitesse d'écoulement est ainsi très réduite dans les argiles. On peut donc remarquer sur les cartes de concentrations que les endroits où l'on retrouve de fortes concentrations sont justement les endroits où l'on retrouve du sable sur la carte des sols (figure 3.3). Alors que les endroits à faibles concentrations ont principalement comme type de sol de l'argile. Les endroits ayant une concentration nulle représentent les forêts ou les cours d'eau sur la carte d'occupation du sol. Dans les forêts et les cours d'eau, il n'y a en effet pas d'épandage d'engrais, donc il n'y a pas de lessivage associé d'azote ou d'atrazine. Cependant, parmi les zones ayant une infiltration nulle, on retrouve aussi les zones de nuage et ombre que l'on a sur l'image satellite. Du fait de la méconnaissance de l'occupation du territoire dans ces secteurs, il n'est pas possible d'en évaluer la vulnérabilité. Dans une approche de cartographie automatique, ces secteurs devraient être clairement identifiés comme n'étant pas évalués.

Sur les cartes de concentrations en nitrates, on remarque cependant qu'à certains endroits on retrouve une concentration de 15-20 mg/l sur la carte des concentrations moyennes alors que cette même zone devient 10-15 mg/l sur la carte des concentrations maximales. Ceci est dû au fait qu'il n'y a qu'une faible différence entre la quantité moyenne et la quantité maximale en nitrates alors que la différence est plus importante en ce qui concerne les quantités d'eau infiltrée. La concentration maximale ainsi calculée devient alors dans certains cas inférieure à la concentration moyenne. Le mode de calcul utilisé pour ces concentrations maximales n'est donc pas fonctionnel, et cette information devrait plutôt être obtenue directement du logiciel EvaRisk.

Un gestionnaire voulant spatialiser les différents résultats du logiciel EvaRisk peut utiliser, tel qu'illustrée, la cartographie réalisée à l'aide du logiciel Idrisi. Bien que cette méthode entraîne des coûts supplémentaires, le résultat ne donne pas simplement une cartographie du territoire à l'étude. En effet, une fois la cartographie du territoire faite, des renseignements supplémentaires sur le territoire peuvent être obtenus à l'aide des fonctions intégrés dans Idrisi. C'est le cas par exemple de la fonction AREA qui renseigne sur la quantité de chaque intervalle retrouvé en légende. On peut ainsi connaître la surface que représente chaque intervalle, en tableau ou sous forme cartographique.

Pour chacune des quatre cartes, un tableau a ainsi été obtenu, donnant le nombre total de cellules de chaque catégorie.

Tableau 4.1 : Concentrations moyennes de nitrates

Classe (N-NO <sub>3</sub> )	%
0	23.67
0.001 - 5	42.76
5 - 10	7.27
10 - 15	20.47
15 - 20	5.83

Tableau 4.2 : Concentrations moyennes d'atrazine

Classe (mg/L)	%
0	23.67
0.0001 - 0.003	38.47
0.003 - 0.006	0.30
0.009 - 0.012	7.26
0.015 - 0.018	0.57
0.018 - 0.021	6.98
0.021 - 0.024	20.05
0.024 - 0.027	2.70

Tableau 4.3 : Concentrations maximales de nitrates

Classe (N-NO <sub>3</sub> )	%
0	23.67
0.001 - 5	42.76
5 - 10	0.30
10 - 15	22.49
15 - 20	10.79

Tableau 4.4 : Concentrations maximales d'atrazine

Classe (mg/L)	%
0	23.67
0.0001 - 0.003	38.47
0.013 - 0.023	7.56
0.053 - 0.063	7.55
0.063 - 0.073	14.94
0.073 - 0.083	5.11
0.083 - 0.093	2.70

Pour les concentrations moyennes de nitrates, 26.30% du territoire se retrouve au-dessus de la norme de 10 mg/l, alors que pour les concentrations maximales de nitrates, ce sont 33.28% du territoire que l'on retrouve au-dessus de la norme. En ce qui concerne les concentrations d'atrazine, 37.86% du territoire sont au-dessus de la norme de 3 $\mu$ g/l, que ce soit pour les concentrations moyennes ou maximales.

Concernant les cartes où l'épaisseur de la couche d'argile (plus de 5 mètres) a été prise en considération (figures 3.10, 3.11 et 3.12), on remarque que la proportion de la zone à infiltration nulle a grandement augmenté. En effet, environ 50 % du territoire est maintenant jugé non infiltré par l'eau ou les contaminants.

## 4.2 Discussion

La première étape consistait à intégrer la télédétection comme paramètre de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines et par la suite à l'intégrer dans le SIG. L'intégration de la télédétection dans le système d'information géographique Idrisi, s'est faite de façon relativement

simple. L'image satellite étant déjà traitée par des spécialistes, le temps d'analyse a été réduit de beaucoup. Le traitement (classification) de l'image peut se faire dans Idrisi, mais c'est une étape demandant beaucoup de temps et, n'ayant pas d'expérience dans ce type de traitement, le résultat final peut être moins précis que lorsque l'opération est réalisée par une firme spécialisée telle que MIR Télédétection.

L'intégration de la télédétection dans la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines a été d'un grand secours en ce qui concerne la cartographie du paramètre d'occupation du sol. En effet, ce paramètre peut avoir besoin d'une mise à jour fréquente, ce qui ne peut être réalisé par la cartographie traditionnelle. L'image de départ qui avait plusieurs classes à cause de la distinction entre les cultures, a été simplifiée dans le SIG en une seule classe *agriculture* grâce à la prise en compte de la rotation. Cette étape a permis de faire une cartographie intégrant ainsi les neuf années du cycle agricole retrouvé sur ce territoire. Par contre, l'étude aurait pu se faire pour chaque culture retrouvée sur l'image de l'occupation du sol, mais la carte n'aurait représenté que le risque de contamination reliée à l'année de l'image satellite, soit 1994. Le choix de représenter le cycle de neuf ans a permis de plus, de réduire le risque d'erreur associé à la classification, principalement entre chaque culture, car c'est entre chaque culture que les erreurs peuvent le plus facilement survenir.

La deuxième étape correspondait au couplage des données recueillies à l'aide du modèle mathématique à celles recueillies avec le SIG et visait à créer les cartes de vulnérabilité des eaux souterraines. Le couplage d'un SIG et d'un modèle mathématique pour la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution s'est réalisé de façon relativement simple. En effet, la base de données du système d'information géographique Idrisi se prête bien au couplage avec les résultats d'un modèle mathématique tel EvaRisk. Ceci permet ainsi une cartographie relativement simple, pouvant être réalisée facilement et sécuritairement par les municipalités ou les entreprises privées voulant obtenir une meilleure gestion du territoire agricole en ce qui à trait



à la protection des eaux souterraines. Afin de faciliter et d'améliorer la rapidité de la méthode, il est certain qu'il serait nécessaire d'intégrer les deux systèmes utilisés, soit Idrisi et EvaRisk.

D'autres méthodes de cartographie de la vulnérabilité existent tel DRASTIC. Comme indiqué précédemment, une application a été faite sur le même territoire (Duchaine, 1995). Les résultats des deux méthodes se ressemblent à certains endroits où la vulnérabilité est considérée comme faible ou nulle. Cependant, les deux méthodes d'évaluation étant très différentes, les résultats diffèrent dans la majorité des cas. On remarque que les résultats de DRASTIC ne tiennent pas compte du type de contaminant (figures 3.13 et 3.14). De plus, DRASTIC donne un indice et non une concentration infiltrée comme c'est le cas dans cette étude. La concentration passant à un mètre de la surface permet de mieux gérer le problème éventuel de contamination, alors qu'avec l'indice DRASTIC le résultat est plus difficile à évaluer, ne sachant pas exactement le comportement spécifique du contaminant.

## 5 CONCLUSION

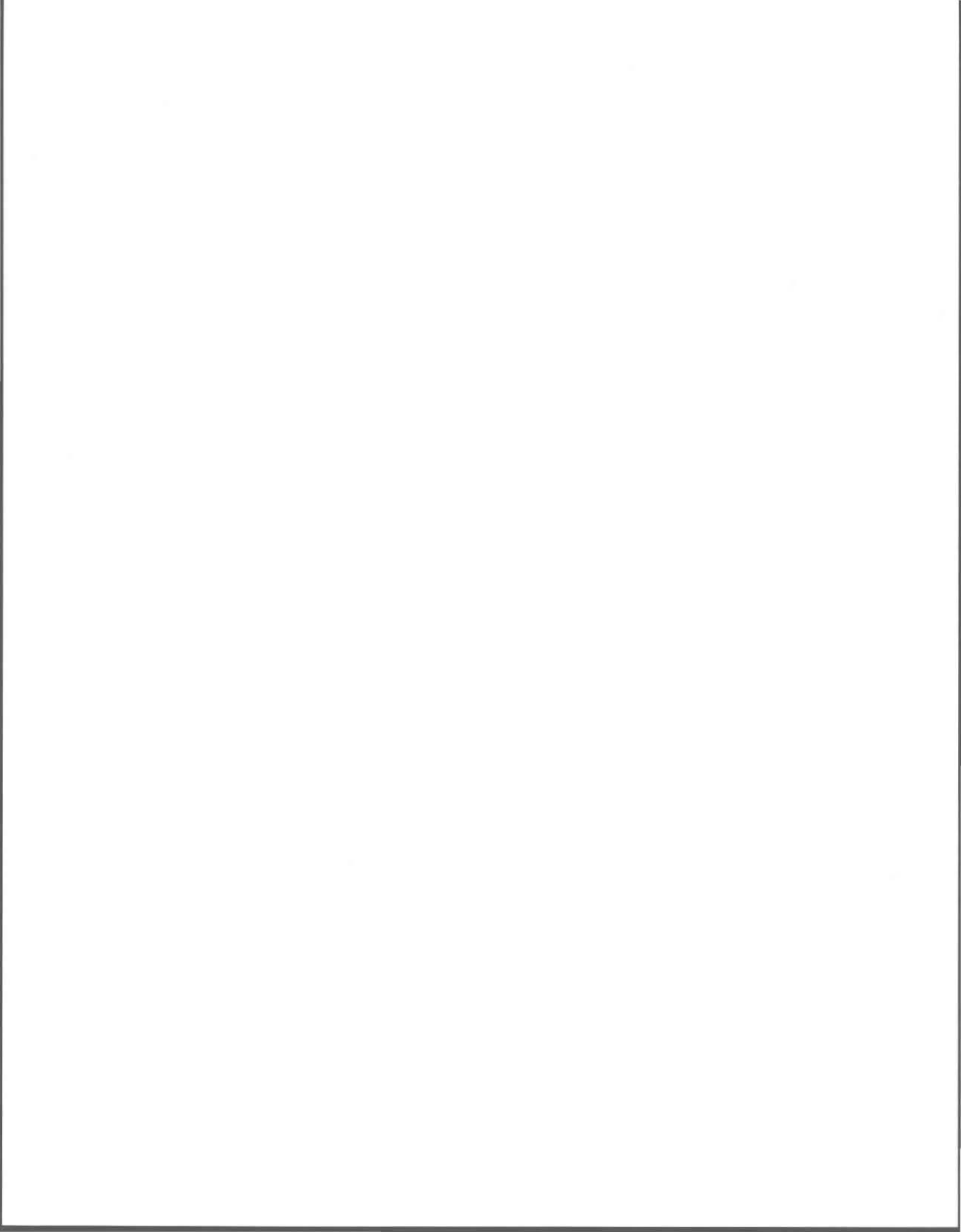
---

La contamination diffuse des eaux souterraines par divers types de produits utilisés dans les activités agricoles représente un problème environnemental majeur. L'identification des zones à risque, telle que réalisée lors de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines, constitue un instrument efficace au service d'une véritable politique de gestion des ressources naturelles.

Ce mémoire a permis de réaliser une cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines, en atteignant les deux objectifs fixés au départ. Le premier objectif était d'intégrer la télédétection comme paramètre de cartographie de la vulnérabilité de l'eau souterraine à la pollution pour ensuite l'intégrer dans un système d'information géographique. Ceci a été fait, en prenant l'occupation du sol comme paramètre extrait de la télédétection pour ensuite l'intégrer dans le SIG Idrisi. Le deuxième objectif était de coupler les données obtenues à l'aide d'un modèle mathématique avec un SIG afin de produire une cartographie de la vulnérabilité de l'eau souterraine. Des simulations sur les quantités d'eau, de nitrates et d'atrazine infiltrées ont été faites avec le modèle mathématique EvaRisk. Une base de données a été créée puis intégrée dans le SIG Idrisi conduisant à la cartographie des concentrations de nitrates et d'atrazine infiltrées. Cette cartographie permet de visualiser les potentiels de contamination des eaux souterraines par les nitrates et l'atrazine sur un territoire donné.

Ces outils informatiques et leur couplage rendront plus accessible l'application de la législation touchant la protection des eaux souterraines, permettront d'évaluer les risques de contamination des eaux de façon fiable et facile, d'établir par la suite des périmètres de protection requis et de gérer les usages des ressources.

Ces outils seront utilisés par les municipalités, les MRC et les entreprises privées, qui veulent connaître, évaluer et gérer les risques de contamination des eaux souterraines



## 6 BIBLIOGRAPHIE

---

Agéos et INRS-Eau (1996). *Développement d'outils pour la gestion intégrée des usages de la ressource - eau souterraine et application à la région hydrogéologique Nord de Montréal*. Rapport d'activités no. 4, Québec, Rapport Agéos et INRS-Eau, 95 p.

Agéos et INRS-Eau (1997). *EvaRisk : Démonstration de l'applicabilité*. 20 Octobre 1997. AGÉOS, Brossard, Québec

Aller, L. et al (1987). *DRASTIC : A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting*. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Okla., EPA/600/2-87/035. 455 p.

Baier, W. (1972). *Evaluation of latent evaporation estimates and their conversion to potential evaporation*. Can. J. Plant Sci. 51:255-266

Banton, O. Larocque, M. et M.A. Gosselin. (1998). *EvaRisk. Manuel d'usager et de développement*. Rapport scientifique INRS-Eau.

Banton, O. et M. Larocque (1997). *AgriFlux2.0. Manuel d'utilisation*. INRS-Eau. Québec. Canada

Banton, O., M. Larocque et M. Cormier. (1995). *Modélisation du transport des nitrates dans la zone non saturée pour l'évaluation de la contamination des eaux souterraines*. Hydrogéologie. No. 4 : 23-30.

Banton, O. et J.-P. Villeneuve (1989). *Evaluation of groundwater vulnerability to pesticides: A comparison of the agricultural DRASTIC index with PRZM leaching concentrations*. J.

Contaminant Hydrol. 4: 285-296.

Bernier, M. (1996). *Application de la télédétection à la gestion des eaux souterraines*. Colloque ESRA, Poitiers, France.

Bernier, M., K.P.B. Thompson et D.N.H. Horler (1984a). *L'aptitude des satellites LANDSAT et SPOT à distinguer les cultures de maïs dans l'est du Canada*. Vol.10, no.1, p. 31-45

Bernier, M., M. Therrien, K.P.B., Thompson et C. Gosselin (1984b). *Potentiel d'application du Thematic Mapper en agriculture au Québec*. Comptes-rendus du 9<sup>ème</sup> Symposium Canadien de Télédétection, 13-14 août 1984, St-Jean, Terre-Neuve, pp. 739-748

Bonn, F. et G. Rochon (1992) *Précis de télédétection*. Presses de l'Université du Québec, vol.1, 495p.

Carignan, M., M. Bernier, O. Dupont et C. Seuthé (1987). *Classification automatique des images Thematic Mapper pour la cartographie de l'utilisation du sol agricole au Québec: aspect opérationnel*. Comptes-rendus du 11<sup>ème</sup> Symposium Canadien de Télédétection, Université de Waterloo, Waterloo, Ontario, 22-25 juin 1987, pp.165-172

Cluis, D., E. Quentin, P. Dupont et P. Marceau (1991). *Évaluation des données d'utilisation du sol acquises par classification d'une image LANDSAT TM et intégrées dans un système d'information géographique à vocation environnementale*. Télédétection et gestion des ressources, vol.7, Comptes rendus du septième congrès de l'Association québécoise de télédétection, pp.63-70

Collectif (1996). *Précis de télédétection*. Bonn, F. (Éditeur), Presse de l'Université du Québec, vol.2, 633 p.

CPVQ, Conseil des Productions Végétales du Québec (1984). *Maïs : culture*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 21 p.

CPVQ, Conseil des Productions Végétales du Québec (1994). *Grilles de référence en fertilisation*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 91 p.

De Sève, D., R. Desjardins et T. Toutin (1994). *Contribution des données radar d'ERS-1 dans l'appréhension de l'organisation des linéaments : le cas de l'astroblème de Charlevoix*. Journal canadien de télédétection vol.20, no.3, pp.233-244

Doorenbos, J. et A.H. Kassam (1980). *Réponses des rendements à l'eau*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 235 p.

Doorenbos, J. et al (1977). *Crop water requirements*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 144 p.

Duchaine, D. (1995). *Cartographie de la vulnérabilité des aquifères de la région de Mirabel par la méthode DRASTIC*. Mémoire de recherche, département de géographie, Université Laval, Québec, 40 p.

Duchesne, L., R. Ouimet, D. Houle et R. Paquin (1996). *Modélisation des flux hybrides et thermiques à l'intérieur de l'écosystème forestier du bassin du lac Clair de la station forestière de Duchesnay*. Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 16 p.

Dupuy, A., O. Banton et M. Razack. (1997a). *Contamination nitrée des eaux souterraines d'un bassin versant agricole hétérogène : I. Évaluation des apports à la nappe (modèle AgriFlux)*. Rev. Sci. Eau. 10(1).

Dupuy, A., M. Razack et O. Banton. (1997b). *Contamination nitrée des eaux souterraines d'un bassin versant hétérogène : II. Évaluation des concentrations dans la nappe*. Rev. Sci. Eau. 10(2).

Eastman, J.R. (1995). *Idrisi, un SIG en mode image*. Clark labs for cartographic technology and geographic analysis. Publication du CRIF, 500 p.

Eastman, J.R. (1997). *Idrisi for Window 2.0*. Clark labs for cartographic technology and geographic analysis. User's guide, 331p.

Globensky, Y. (1987). *Géologie des basses-Terres du Saint-Laurent*, Gouvernement du Québec, Ministère de l'énergie et des ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale, rapport MM 85-02.

Globensky, Y. (1982). *Carte de géologie des sols*. Ministère de l'énergie et des ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale.

Globensky, Y. (1982). *Géologie de la région de Lachute*, Ministère de l'énergie et des ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale, service des levés géologiques, rapport géologique 200.

Krogman, K. K. et E.H. Hobbs (1978). *Adapter l'irrigation aux besoins des cultures*. Service de l'information, Ministère de l'Agriculture du Canada, 22 p.

Lajoie, P.G. (1960). *Les sols des comtés d'Argenteuil, Deux-Montagnes et Terrebonne*. Service de recherche, ministère de l'Agriculture du Canada. 148 p.

Larocque, M. et O. Banton. (1996). *Using field data and simulation modeling to determine nitrogen cycle parameters*. Soil Sci. Soc. Am. J. 60 :1840-1845.

Larocque, M. et O. Banton. (1995). *Gestion de la contamination des eaux souterraines par les fertilisants agricoles: application du modèle AgriFlux*. Rev. Sci. Eau 8 : 3-21.

MAOO (1995-96). *Recommandations pour les grandes cultures 1995-1996*. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario, 112 p.

Merzouk, A. (1994). *Utilisation de la télédétection spatiale dans l'étude et l'inventaire des sols en zone semi-aride*. Dans F. Bonn (dir), *Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone*, Sainte-Foy, PUQ, pp. 21-30

Nye, P.H. et P.B. Tinker (1977). *Solute movement in the soil-root system*. University of California Press, 342 p.

O'Leary, D.W *et al.* (1976). *Lineament and linear lineation : Some Proposed New Standards for Old Term*. Geological Society of America Bulletin, vol.87, pp. 1463-1469



Rochette, P. (1988). *Contributions au zonage agroclimatique de Québec méridional*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec

Sander, P., M.M. Chesley et T.B. Minor (1996). *Groundwater assessment using remote sensing and GIS in a rural groundwater project in Ghana : lessons learned*. Hydrogeology journal, vol. 4, no. 3, pp.40-49

Simard, G. (1978). *Hydrogéologie de la région de Mirabel*, Rapport HG-11, Gouvernement du Québec, Ministère des richesses naturelles, Direction générale des eaux, Service des eaux souterraines.

Simard, G., M. Sylvestre, (1977). *Vulnérabilité des ressources en eau souterraine du Québec à la pollution*. Rev. Assoc. Qué. Tech. Eau, 15.

Strategic Locations Planning (1988). *ATLAS\*DRAW- Boundary Digitizing, Drawing, Manipulation and Analysis, user's guide*. Version 2.03, Strategic locations planning inc., San Jose, California, USA

Tabi, M. et al (1990). *Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec, région agricole 8 Outaouais*. Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agro-alimentaire, MAPAQ, 97 p.

Van Genuchten, M. TH., (1978). *Simulation models and their application to landfill disposal siting; a review of current technology*. Proc. of 4th annual research symp. EPA 600/9-78/016.

Weaver, J.E. (1926). *Root development of field crops*. McGraw-Hill Book Company, 291p.

## 7 ANNEXE 1

Tableau 7.1 : Légende de la carte pédologique

Symbole	No	Texture	Drainage	Roche mère
Ac	1	sable très fin	imparfait	sable fin sur argile
Am	2	sable	variable	sable sur argile
Au	3	alluvion à surface sableuse		
Auh	4	alluvion à surface argileuse		
B	5	argile	mauvais	argile et limon stratifié
Bn	6	terre franche	bon	till sur calcaire
Bn-a	7	terre franche mince	bon	till calcaire sur roc cal.
Br	8	terre franche sableuse	bon	till d'origine mixte
Bt	9	sable limoneux	bon	sable sur till calcaire
Bx	10	sable limoneux	très mauvais	sable sur till calcaire
C	11	terre franche sableuse mince	bon	ter. fra. sableuse sur till
Cb	12	terre franche sableuse rocheuse	bon	till non-calcaire
Ch	13	terre franche argileuse	bon-imparfait	ter. fr.argileuse sur till
Cn	14	terre franche sablo-graveleuse	excessif	gravier non-calcaire
Ct	15	terre franche sabl. très fine	bon	sable très fin limoneux sur argile
Cv	16	terre franche sableuse	mauvais	sable mince sur argile
D	17	argile et terre franche argileuse	imparfait	argile grise
Dc	18	terre franche argileuse et argile	imparfait	alluvion argileuse
Dm	19	sable limoneux	imparfait	sable mince sur argile
I	20	sable fin limoneux	excessif	sable fin
J	21	sable fin	imparfait	sable fin +med sur argile
Jf	22	terre franche sableuse légère	imparfait	sable fin +med.sur argile

Jp	23	terre franche sablo-graveleuse	excessif	gravier calcaire
L	24	sable	excessif	dunes de sable
Le	25	terre franche limoneuse	bon	alluvion limoneuse
Lp	26	argile et terre franche argileuse	très mauvais	argile grise
M	27	terre franche argileuse	mauvais	ter.fra.argileuse sur till
Mk	28	terre noire	très mauvais	dépôts organique
Mk-a	29	terre noire	très mauvais	mince dépôt organique
Ml	30	sable	bon-excessif	sab.grossier et grav. fin sur argile
Mo	31	sable	excessif	sable moyen à grossier
P	32	terre franche sableuse	bon	till non-calcaire
Pt	33	tourbe	très mauvais	dépôt organique mal décomposé
R	34	argile	mauvais	argile marine grise
Ri	35	sable très fin	mauvais	argile marine grise
Rg	36	argile	bon	till graveleux n-calcaire
Ri	37	argile	imparfait	argile marine grise
Th	38	sable très fin		
U	39	argile	mauvais	argile grise calcaire
Up	40	sable fin	excessif	sable fin et medium
V	41	sable limoneux	très mauvais	sable mince sur argile
Vt	42	terre franche sableuse	mauvais	till d'origine mixte
W	43	argile	imparfait	argiles brune et grise
*	44	terrain marécageux	très mauvais	variable
✓	45	affleurement de roc		

Tableau 7.2 : Base de données

IDR_ID	Eau qté moy. ann. (m)	Eau qté max. ann.(m)	Azote qté moy. ann. (kg/ha)	Azote qté max. ann. (kg/ha)	Atrazine qté moy.ann. (kg/ha)	Atrazine qté max.ann. (kg/ha)
1	0.43	0.53	57	80	0.1	0.4
2	0.5	0.53	0	0	0	0
3	0.41	0.43	0	0	0	0
4	0.43	0.53	57	80	0.1	0.4
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0.43	0.53	55	80	0.11	0.48
8	0.5	0.52	0	0	0	0
9	0.41	0.43	0	0	0	0
10	0.43	0.53	55	80	0.11	0.48
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0.43	0.53	56	81	0.1	0.43
14	0.5	0.53	0	0	0	0
15	0.41	0.44	0	0	0	0
16	0.43	0.53	56	81	0.1	0.43
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0.41	0.51	63	72	0.09	0.34
20	0.5	0.52	0	0	0	0
21	0.4	0.42	0	0	0	0
22	0.41	0.51	63	72	0.09	0.34
23	0	0	0	0	0	0

24	0.38	0.47	42	63	0.08	0.31
25	0.45	0.48	0	0	0	0
26	0.35	0.38	0	0	0	0
27	0.38	0.47	42	63	0.08	0.31
28	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0
30	0.39	0.48	40	54	0.07	0.26
31	0.48	0.5	0	0	0	0
32	0.32	0.34	0	0	0	0
33	0.39	0.48	40	54	0.07	0.26
34	0	0	0	0	0	0
35	0.31	0.42	30	45	0.06	0.225
36	0.41	0.43	0	0	0	0
37	0.28	0.3	0	0	0	0
38	0.31	0.42	30	45	0.06	0.225
39	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
41	0.34	0.44	27	41	0.018	0.074
42	0.43	0.45	0	0	0	0
43	0.28	0.31	0	0	0	0
44	0.34	0.44	27	41	0.018	0.074
45	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0
47	0.15	0.23	3.6	7.4	0.016	0.043
48	0.23	0.24	0	0	0	0
49	0.125	0.135	0	0	0	0
50	0.15	0.23	3.6	7.4	0.016	0.043

51	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
53	0.006	0.016	0.0035	0.01	0.00008	0.00027
54	0.019	0.022	0	0	0	0
55	0.0027	0.0035	0	0	0	0
56	0.006	0.016	0.0035	0.01	0.00008	0.00027
57	0	0	0	0	0	0
58	0.42	0.52	55	80	0.1	0.43
59	0.5	0.53	0	0	0	0
60	0.41	0.43	0	0	0	0
61	0.42	0.52	55	80	0.1	0.43
62	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0
64	0.43	0.54	55	81	0.0012	0.005
65	0.5	0.52	0	0	0	0
66	0.41	0.43	0	0	0	0
67	0.43	0.54	55	81	0.0012	0.005
68	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	0	0	0
72	0	0	0	0	0	0
73	0	0	0	0	0	0

