

Université du Québec

INRS-Géoressources

**ÉTUDE COMPARATIVE DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA
VULNÉRABILITÉ INTRINSÈQUE DES AQUIFÈRES À LA POLLUTION :
APPLICATION AUX AQUIFÈRES GRANULAIRES DU PIÉMONT
LAURENTIEN.**

Par

Valérie Murat

Mémoire présenté

pour l'obtention

du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur externe

Luc Champagne, M.Sc.A.

Ministère de l'environnement
et de la faune du Québec

Examineur interne

Alfonso Rivera, Ph.D.

Commission géologique du Canada

Co-directeurs de recherche

Yves Michaud, Ph.D.

Commission géologique du Canada

René Therrien, ing., Ph.D.

Université Laval

Directeur de recherche

Richard Martel, ing., Ph.D.

INRS-Géoressources

(3, Novembre 2000)

© droits réservés de Valérie Murat, 2000



RÉSUMÉ

Le but de ce projet, réalisé conjointement par le Centre géoscientifique de Québec, l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Géoressources), l'Université Laval, le MENV et la MRC de Portneuf vise la mise en place d'une démarche pour la réalisation de cartes de vulnérabilité régionale, en prenant pour région d'application la MRC de Portneuf (terrain d'environ 4000 km² à 50 km à l'ouest de Québec).

Au Canada, 26% de la population est tributaire de l'eau souterraine pour ses besoins domestiques; ce pourcentage s'élève à 21% au Québec. La qualité de cette eau est sans cesse mise à l'épreuve par la menace grandissante associée aux sources potentielles de pollution. Il est important, dans le contexte actuel, que des mesures soient prises afin d'assurer la pérennité de la ressource. L'estimation de la vulnérabilité intrinsèque permet de prévenir une partie de la contamination en aidant à la prise de décision en matière de gestion du territoire.

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de la vulnérabilité. L'étude présentée ici a pour objectif, de déterminer quelle méthode s'avère la plus efficace et réaliste du point de vue de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque. Elle doit établir deux compromis, choisir une méthode dont le nombre de paramètre est suffisant mais pas trop élevé (difficulté pour se procurer l'information); et équilibrer la quantité d'information nécessaire versus celle disponible (la collecte pouvant engendrer des coûts élevés). Cette étude a été réalisée en deux parties, un volet pour l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque en appliquant 4 méthodes d'estimation et un second volet pour l'analyse statistique concernant la place de chacun des paramètres dans les diverses méthodes et la variabilité de l'estimation de la vulnérabilité d'une méthode à l'autre.

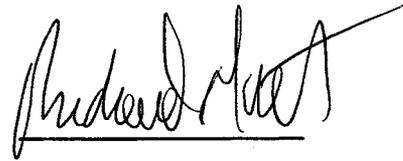
Les méthodes d'estimation retenues sont : la méthode DRASTIC (7 paramètres), la méthode GOD (3 paramètres), la méthode Minnesota (utilisant 4 paramètres sur 3 niveaux) et la méthode EVARISK pour laquelle la plupart des variables font partie intégrante du modèle. Le choix des méthodes a été basé sur les différents types de méthodes (cotation numérique, analytique, cartographique) disponibles dans la littérature et sur l'information disponible, en rapport avec l'application de la méthode et les données utiles à sa réalisation. L'incorporation des résultats dans des systèmes d'information géographique (SIG tels que Mapinfo, IDRISI, ArcInfo) permet de structurer et faciliter l'accès et l'intégration de l'information.

L'application de la comparaison de ces méthodes a été effectuée au niveau des aquifères granulaires du piémont laurentien. Ce secteur a été sélectionné pour sa diversité tant pour la présence d'aquifères représentatifs de la rive nord du Saint-Laurent, que pour la diversité au niveau de l'utilisation des sols et de la géologie.

L'application de ces 4 méthodes permet de voir que les résultats obtenus pour les méthodes DRASTIC, Minnesota et GOD sont fortement influencés par la nature des formations superficielles et diffèrent d'avec la carte EVARISK, basée sur les caractéristiques pédologiques du terrain. Il est à noter que l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque est une notion relative, c'est-à-dire que les valeurs obtenues pour chaque méthode sont parfois subjectives et interprétables méthode par méthode. L'étude statistique de surface réalisée en comparant les méthodes deux à deux, permet de mettre en relation la variation spatiale de l'indice de vulnérabilité d'une méthode à l'autre sans tenir compte de la valeur de cet indice. On a pu remarquer que la superposition des méthodes DRASTIC et Minnesota met en évidence une bonne adéquation dans l'estimation de la vulnérabilité de la MRC de Portneuf. Les tests géostatistiques mettent en évidence l'importance des paramètres pour chaque méthode et l'adéquation des méthodes par rapport à la méthode DRASTIC.



Valérie Murat



Richard Martel

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier très sincèrement mon directeur de recherche, M. Richard Martel pour ses nombreux conseils et l'aide qu'il m'a apporté pour la réalisation de cette étude. Je désire également remercier mes codirecteurs M. Yves Michaud pour sa disponibilité et ses conseils et M. René Therrien pour la confiance qu'il m'a accordée en m'offrant l'opportunité de connaître l'INRS-Géoressources.

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui sont impliquées dans le projet Piémont Laurentien pour leur contribution de près ou de loin au bon déroulement du projet. Je tiens particulièrement à souligner la contribution de M. Éric Boisvert et Mme Nathalie Fagnan.

Je remercie également la Commission Géologique du Canada et l'INRS pour les bourses qui m'ont été octroyées durant le temps de cette maîtrise.

Je tiens à remercier par avance les correcteurs de ce mémoire pour leur lecture critique et leurs commentaires.

Je remercie ma famille qui a su me prodiguer toute son affection et ses encouragements malgré l'éloignement. Je remercie également Sébastien pour sa patience, ses conseils et ses encouragements. Je tiens également à remercier mes collègues, ami(e)s pour leur soutien moral et pour leur amitié. Enfin, je remercie Olivier pour son aide.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	v
REMERCIEMENTS.....	vii
TABLE DES MATIÈRES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xiii
INTRODUCTION.....	1
PROBLÉMATIQUE.....	1
OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	2
UTILISATION DES INFORMATIONS FOURNIES PAR CETTE ÉTUDE.....	4
CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE.....	5
1.1 DÉFINITION ET HISTORIQUE DE LA VULNÉRABILITÉ.....	5
1.2 ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ.....	9
1.2.1 <i>Intervention des différents processus et propriétés selon la zone concernée.....</i>	<i>11</i>
1.2.2 <i>Relations des processus avec les paramètres.....</i>	<i>14</i>
1.2.3 <i>Remarque.....</i>	<i>18</i>
1.3 CLASSEMENT DES MÉTHODES ET REVUE DE LITTÉRATURE.....	18
1.3.1 <i>Place des cartes de vulnérabilité dans le schéma de classification environnemental.....</i>	<i>18</i>
1.3.2 <i>Classements des méthodes par groupe.....</i>	<i>19</i>
1.3.3 <i>Introduction à la technique de classification.....</i>	<i>20</i>
1.3.3.1 <i>Méthodes contextuelles.....</i>	<i>21</i>
1.3.3.2 <i>Méthodes des systèmes paramétriques.....</i>	<i>22</i>
1.3.3.3 <i>Méthodes analytiques et de modélisation numérique.....</i>	<i>23</i>
1.3.4 <i>Revue des méthodes de vulnérabilité.....</i>	<i>23</i>
CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE.....	35
2.1 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	35
2.1.1 <i>Physiographie et hydrographie de la MRC de Portneuf.....</i>	<i>35</i>
2.1.2 <i>Contexte quaternaire, description succincte des unités.....</i>	<i>36</i>
2.1.3 <i>Qualité de l'eau souterraine.....</i>	<i>39</i>
2.2 ÉLÉMENTS DE RÉALISATION DES CARTES DE VULNÉRABILITÉ.....	40
2.2.1 <i>Contenu des cartes de vulnérabilité.....</i>	<i>41</i>
2.2.2 <i>Échelle de réalisation des cartes.....</i>	<i>42</i>
2.2.3 <i>L'utilisation des SIG pour les cartes de vulnérabilité.....</i>	<i>43</i>
2.2.4 <i>Acquisition de données.....</i>	<i>44</i>
2.2.5 <i>Utilisation et limitations des cartes de vulnérabilité.....</i>	<i>46</i>
2.2.6 <i>Conclusion.....</i>	<i>46</i>
2.3 CHOIX DES MÉTHODES.....	47
2.3.1 <i>Choix du type de méthode.....</i>	<i>49</i>
2.3.2 <i>Choix de la méthode.....</i>	<i>49</i>
2.4 DESCRIPTION DES MÉTHODES RETENUES ET APPLICATION.....	50
2.4.1 <i>La méthode DRASTIC.....</i>	<i>50</i>
2.4.1.1 <i>Théorie.....</i>	<i>50</i>
2.4.1.2 <i>Limitations.....</i>	<i>53</i>
2.4.1.3 <i>Origine de l'étude et controverse au sujet de la méthode DRASTIC.....</i>	<i>53</i>
2.4.1.4 <i>Données.....</i>	<i>58</i>
2.4.1.5 <i>Application.....</i>	<i>59</i>
2.4.2 <i>La méthode GOD.....</i>	<i>60</i>
2.4.2.1 <i>Théorie.....</i>	<i>60</i>
2.4.2.2 <i>Particularité de la méthode.....</i>	<i>63</i>

2.4.2.3	Limitations	64
2.4.2.4	Données	64
2.4.2.5	Application	65
2.4.3	<i>La méthode du département des ressources naturelles du Minnesota</i>	67
2.4.3.1	Théorie.....	67
2.4.3.2	Limitations.....	71
2.4.3.3	Données	71
2.4.3.4	Application	72
2.4.4	<i>La méthode EVARISK</i>	76
2.4.4.1	Théorie.....	76
2.4.4.2	Limitations.....	78
2.4.4.3	Données	78
2.4.4.4	Application	79
2.5	LES TESTS STATISTIQUES	82
2.5.1	<i>Test de corrélation entre méthodes :</i>	83
2.5.1.1	L'analyse de surface	83
2.5.1.2	L'analyse de fréquence et test de conformité	84
2.5.1.2.1	Théorie	84
2.5.1.2.2	Remarques et limitations	87
CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....		89
3.1	LA MÉTHODE DRASTIC.....	89
3.2	LA MÉTHODE GOD	91
3.3	LA MÉTHODE DÉVELOPPÉE PAR LE DÉPARTEMENT DES RESSOURCES NATURELLES DU MINNESOTA	92
3.4	LA MÉTHODE EVARISK	94
3.5	DISCUSSION	96
3.6	CONCLUSION	99
CHAPITRE 4 : COMPARAISON DES MÉTHODES		101
4.1	INTRODUCTION	101
4.2	COMPARAISON DES MÉTHODES	102
4.3	COMPARAISON DES PARAMÈTRES.	107
4.4	CONCLUSION	109
CHAPITRE 5 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		113
5.1	CONCLUSIONS GÉNÉRALES	113
5.1.1	<i>Conclusions relatives à l'application des méthodes à la MRC de Portneuf.</i>	113
5.1.2	<i>Outils informatiques et statistiques</i>	115
5.2	RECOMMANDATIONS	117
5.2.1	<i>Travaux recommandés en complément d'une évaluation de vulnérabilité dans le cadre de l'étude dans la MRC de Portneuf</i>	118
RÉFÉRENCES.....		119
ANNEXE I : Répertoire non exhaustif des méthodes d'estimation de la vulnérabilité.....		129
ANNEXE II: Synthèse des méthodes de vulnérabilité. Leurs applicabilités et leurs particularités.		193
ANNEXE III : Comparaison des paramètres.....		205
ANNEXE IV : Type de sol dans la MRC. Traitement par EVARISK.....		211
ANNEXE V : Cartes pour la localisation.....		247
ANNEXE VI : Carte des formations superficielles.....		253
ANNEXE VII : Cartes de vulnérabilité.....		258
ANNEXE VIII : Cartes de comparaison.....		267

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Définitions de la vulnérabilité intrinsèque.....	6
Tableau 2 : Index des dangers de contamination (modifié de Civita & De Maio, 1997).....	8
Tableau 3 : Récapitulation des éléments à prendre en compte (tiré de Albinet et Margat, 1970)..	10
Tableau 4 : Définitions et remarques concernant les principaux processus.....	13
Tableau 5 : Définitions et remarques concernant les principales propriétés.....	13
Tableau 6 : Système de classification des cartes hydrogéologiques selon Struckmeier (1989)....	19
Tableau 7 : Diverses classifications possibles des méthodes en groupes et sous-groupes.....	20
Tableau 8 : Répertoire non exhaustif des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique et paramètres pris en compte (modifié de Vrba et Zaporozec, 1994; Aubre, 1992)....	27
Tableau 9 : Transformation sous forme d'échelle du système de cotation de la profondeur à la nappe (tiré de Trojan et Perry, 1988).....	34
Tableau 10 : Formations quaternaires retrouvées dans la MRC de Portneuf.....	39
Tableau 11 : Provenance des données nécessaire à l'établissement des cartes (tiré de Michaud et Lefebvre, (éd.) 2000).....	45
Tableau 12 : Classification des indices DRASTIC (Aller et al., 1987).....	51
Tableau 13 : Exemples d'applications de la méthode DRASTIC.....	55
Tableau 14 : Principaux facteurs contrôlant la vulnérabilité des aquifères à la pollution (modifié de Foster et Hirata, 1991).....	60
Tableau 15 : Position de la carte d'estimation de la vulnérabilité dans le schéma de l'évaluation de l'aquifère et par rapport à la carte d'évaluation du risque.....	63
Tableau 16 : Correspondance des unités hydrogéologiques de la MRC avec les types d'aquifères proposés pour GOD.....	65
Tableau 17 : Formations présentes dans la MRC et coïncidence avec les formations proposées par la méthode GOD.....	66
Tableau 18 : Variation de la cotation de la profondeur selon GOD et DRASTIC.....	66
Tableau 19 : Classification de la sensibilité selon la méthode du Minnesota.....	69
Tableau 20 : Paramètres nécessaires à la réalisation des cartes de vulnérabilité de la méthode du Minnesota (the geologic sensitivity project workgroup, 1991).....	70
Tableau 21: Formations présentes dans la MRC de Portneuf d'après la carte quaternaire et coïncidence avec les formations proposées par la méthode du Minnesota (niveau 1).....	73

Tableau 22 : Indices de vulnérabilité correspondant aux formations superficielles rencontrées pour Minnesota (niveau 1).....	74
Tableau 23 : Classement des matériaux du niveau de la nappe par catégories (the geologic sensitivity workgroup, 1991).....	75
Tableau 24 : Classification des utilisations du sol dans EVARISK (Banton (1999, communication orale)).....	80
Tableau 25 : Schématisation du test de Kappa (modifié de Bernard, 1993).....	86
Tableau 26 : Échelle d'interprétation de Kappa (Bernard, 1993).....	86
Tableau 27 : Différence d'indice entre le niveau 1 et 2 de la méthode Minnesota dans la zone des 2 bassins.....	93
Tableau 28 : Différence d'indice entre le niveau 1 et 2 de la méthode Minnesota en dehors des zones des 2 bassins.....	93
Tableau 29 : Différence d'indice entre les niveaux 1 et 2 de la méthode Minnesota sur toute la carte.....	94
Tableau 30 : Densité de point au km ² pour chaque formation superficielle.....	98
Tableau 31 : Matrice de comparaison de fréquence des surfaces d'indices identiques, test de Kappa.....	103
Tableau 32 : Matrice des résultats de proportion d'accord Ho de Kappa.....	104
Tableau 33 : Graphes de comparaison de surface des indices de chaque méthode prises deux à deux.....	104

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les différents processus et propriétés et la zonation hydrogéologique.....	12
Figure 2 : Bilan hydrologique (modifiée à partir de Domenico et Schwartz, 1990).....	17
Figure 3 : Mise en place des dépôts de till et des sédiments glacio-marins et construction de la Moraine de Saint-Narcisse (12000 à 10400 BP) (Parent (1997, données inédites)).....	38
Figure 4 : Architecture des dépôts quaternaires de manière simplifiée (Parent (1997, données inédites)).....	38
Figure 5 : Exemple d'un format de carte de vulnérabilité (tiré de Vrba et Zaporozec, 1994).....	41
Figure 6 : Systèmes matriciel et vectoriel (tiré de Cooper <i>et al.</i> , 1997).....	44
Figure 7 : Organigramme pour l'aboutissement à une méthode de vulnérabilité.....	48
Figure 8 : La méthode DRASTIC, paramètres et cotation.....	52
Figure 9 : La méthode GOD, paramètres et cotation.....	62
Figure 10 : La méthode Minnesota, paramètres et cotation.....	68
Figure 11 : La méthode EVARISK, paramètres et cotation.....	77

INTRODUCTION

Problématique

Au Canada 26% de la population est tributaire de l'eau souterraine pour ses besoins domestiques et les deux tiers de ces usagers vivent dans les régions rurales. Au Québec, où 21% de la population dépend de l'eau souterraine pour son approvisionnement en eau potable, les plus gros utilisateurs sont les municipalités en dehors des grands centres. En effet, le secteur agricole de l'économie québécoise compte sur l'eau souterraine pour satisfaire 78% de ses besoins en eau.

La qualité de cette eau est sans cesse mise à l'épreuve du fait de l'augmentation des sources de pollution tant diffuses venant des activités agricoles, que ponctuelles venant des activités industrielles, des déversements accidentels de substances toxiques, de sites d'enfouissement de déchets, de fuites de réservoirs enfouis ou hors terres. De plus, beaucoup de contaminants potentiellement polluants peuvent être sans couleur, sans odeur ou sans goût et donc difficile à détecter sans analyses spécifiques. L'eau souterraine peut se décontaminer naturellement lors de son passage dans le sol vers la nappe phréatique. Cette décontamination dépend d'un certain nombre de facteurs, dont le type de sol, le type de contaminant et la quantité de contaminant. Pour cette étude nous ne tenons pas compte du type de polluant. Les propriétés de densité, de fluidité, de persistance de l'eau en font le pire des contaminants, car aucun processus d'atténuation n'affecte son transport. L'eau a donc été choisi comme élément de référence en supposant que l'infiltration des contaminants suit les propriétés de l'eau.

Étant donné les coûts importants engendrés par la restauration des aquifères contaminés, il est important, dans le contexte environnemental actuel, que des mesures soient prises afin de protéger les aquifères de la pollution tout en étant conscient que les activités humaines sont une nécessité au sein de la société. Une des approches d'aide à la prévention de la pollution de l'eau souterraine est la connaissance des zones spécialement vulnérables. Les cartes de vulnérabilité, ne remplacent pas les mesures de protection des eaux souterraines existantes, mais complètent utilement les

informations disponibles pour l'aménagement du territoire. Un des moyens de protection des aquifères est l'établissement de périmètres de protection. Ainsi en Allemagne, les périmètres de protection des eaux utilisées représentent 7.7% de la surface du territoire (d'après Müller, 1990 dans Schleyer, 1994).

L'identification des zones de plus forte vulnérabilité permet de prévenir une partie de la contamination en guidant le gestionnaire lors de l'aménagement du territoire. Il existe plusieurs méthodes d'estimation de la vulnérabilité. L'étude présentée ici a pour objectif de déterminer quelle méthode s'avère la plus efficace et réaliste du point de vue de l'évaluation de la vulnérabilité. Un compromis doit être établi entre les différentes données nécessaires à l'établissement de chaque paramètre versus le nombre de fois où ces mêmes données seront utilisées par l'ensemble des paramètres; et entre la quantité d'information nécessaire, dont la collecte peut engendrer des coûts élevés, versus celle disponible.

Il est nécessaire de préciser que ce qui est évalué dans l'étude de vulnérabilité des aquifères, c'est la possibilité qu'une eau soit polluée suite à l'apport d'un contaminant sur ou près de la surface. Les facteurs de pollution sont nombreux et le plus souvent liés aux activités humaines. On considère une contamination comme réelle quand la liaison de cause à effet entre la source de pollution et la présence du polluant dans la nappe est clairement établie et on considère une pollution comme potentielle quand les polluants ne présentent qu'un risque permanent ou accidentel (Fréchette, 1987). Dans la présente évaluation, seuls les problèmes de pollution liés à un apport de contaminant par une activité humaine sont pris en compte. Tous les problèmes naturels de qualité des eaux ne seront pas retenus, tel la présence de métaux lourds dans l'eau souterraine suite à son passage à travers une roche granitique minéralisée.

Objectif de l'étude

Ce projet vise à mettre en place une démarche pour la réalisation de cartes de vulnérabilité régionale, et à appliquer ce travail à la MRC de Portneuf. L'étude s'inscrit dans un projet de cartographie hydrogéologique des eaux souterraines débuté en 1995 par la Commission géologique du Canada (CGC-Québec), l'INRS-Géoressources, le ministère de l'Environnement (MENV), l'Université Laval et la MRC de Portneuf.

Une première carte de vulnérabilité utilisant la méthode DRASTIC a été réalisée pour la MRC de Portneuf, lors du projet de cartographie hydrogéologique (Fagnan, 1998). Le principal objectif de la présente étude est de déterminer si cette méthode donne des résultats fiables ou non.

DRASTIC est une méthode qui a été élaborée pour les États-Unis, de manière à uniformiser les cartes en Amérique du Nord. Une des questions qui se pose c'est : est ce que la méthode DRASTIC est applicable partout ? En effet, cette méthode a été développée de manière empirique aux États-Unis pour et à partir des conditions qui prévalent là-bas. Mais les conditions météorologiques et hydrologiques du Québec ne correspondent pas, en général, à celles des États-Unis, aussi il est important de savoir dans quelle mesure cette méthode est applicable dans une région dont les caractéristiques non pas forcément été prises en compte lors de son élaboration.

L'étude de la vulnérabilité des aquifères comporte deux objectifs : 1) estimer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères granulaires, et incorporer les résultats dans un système d'information géographique (SIG); 2) comparer statistiquement les différentes méthodes afin de déterminer quel est leur degré d'adéquation et d'où viennent les différences d'évaluation.

Le mémoire de maîtrise est organisé en cinq parties :

1) une première partie permet d'exposer les principes de base du concept de vulnérabilité et ses limites. Une revue, non exhaustive, des méthodes d'estimation de la vulnérabilité répertoriées dans la littérature donne un aperçu de l'importance et de la diversité de cette notion;

2) une méthodologie générale sur le choix et l'application des méthodes d'estimation de la vulnérabilité est effectué;

3) l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque sur le territoire de la MRC de Portneuf par 4 méthodes est réalisé et discuté;

4) la comparaison statistique des 4 méthodes choisies permet de statuer sur la variation d'évaluation de la vulnérabilité sur un territoire donné;

5) l'application d'une méthode de chaque type, et la comparaison statistique permet de guider un éventuel utilisateur dans la démarche d'un choix de méthode.

La présente étude devrait contribuer à l'établissement d'une définition standardisée du terme vulnérabilité des eaux souterraines, et à la réalisation d'un guide de vulnérabilité. Ce guide technique permettrait de répertorier un grand nombre de méthodes créées par différents groupes d'intérêts et d'élaborer une marche à suivre dans l'établissement de cartes de vulnérabilité au

Québec. Il permettra aussi de guider l'utilisateur dans le choix d'une méthode adaptée à ses besoins ; c'est-à-dire selon les données disponibles, les propriétés du milieu et l'échelle recherchée.

Utilisation des informations fournies par cette étude

Les résultats obtenus lors de cette étude sont intégrés et synthétisés dans une planche cartographique (Murat *et al.*, 2000a). Cette planche résume l'essentiel des travaux d'estimation de la vulnérabilité des aquifères granulaires à la pollution réalisés dans la MRC de Portneuf. Ce document présente la synthèse des informations existantes ainsi que l'application et la comparaison statistique de quelques méthodes d'estimation de la vulnérabilité. L'objectif visé est l'élaboration d'une démarche à suivre pour réaliser une carte de vulnérabilité réaliste et efficace des nappes libres à moindre coût.

Un guide de vulnérabilité a également été réalisé dans le cadre de cette étude (Murat *et al.*, 2000b). L'objectif de ce guide est de permettre une meilleure compréhension des diverses notions de la vulnérabilité, de l'applicabilité et des limites d'application de ces notions et permet d'aider au choix et à la réalisation de cartes. Ces cartes ont pour but de montrer les grandes tendances de la vulnérabilité pour l'affectation d'activités à risque sur des territoires locaux. Les objectifs à courts termes de ce guide sont de sensibiliser les lecteurs à l'importance, en matière de prise de décision, de l'évaluation de la vulnérabilité adaptée à un territoire donné. À long terme, il s'agit de permettre une meilleure gestion du territoire dans les secteurs agricoles ou industriels.

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE

Dans ce chapitre sont regroupés tous les éléments qui vont servir à mieux comprendre la notion de vulnérabilité et les concepts qui sont associés à cette notion. Une synthèse des moyens et outils disponibles à l'évaluation de la vulnérabilité est également effectuée dans cette section afin de compléter l'information.

1.1 Définition et historique de la vulnérabilité

La prise de conscience de la nécessité de protection de la ressource en eau est présente depuis très longtemps dans nos sociétés. Mais depuis quelques décennies, l'exigence de planification du territoire selon des modalités tolérables pour l'environnement souterrain a contribué au développement de la notion d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, on peut le remarquer par le développement de nombreuses méthodes d'estimation de la vulnérabilité. La nécessité de classer les sources de contamination, et de définir les conditions de protection des eaux souterraines se sont fait sentir dans les années 1960 quand Vladimirskij suggéra le développement d'une méthode, précurseur des cartes de vulnérabilité, permettant la construction de cartes de potentiel de contamination des eaux souterraines. Margat et Albinet (1970) pour leur part élaboraient en France dans les années 1970 une carte de vulnérabilité des eaux souterraines à l'échelle du pays.

Le terme vulnérabilité date des années 1960 et a été choisi afin de sensibiliser la population au fait que même si la notion d'eau souterraine est associée à une image de pureté, cette ressource n'en reste pas moins sensible aux agents extérieurs et susceptible d'être polluée. Selon la nature et la structure des sols et aquifères le concept de vulnérabilité pourra prendre des formes et des degrés variés de manière à mettre en évidence les capacités de résistances naturelles diverses des milieux (Margat, 1991). D'après Albinet et Margat (1970), les cartes de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine servent à montrer quelles sont les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans les aquifères en tenant compte de la nature des

terrains rencontrés en surface et les conditions hydrogéologiques. Cependant, il n'existe aucune définition officielle de la vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994) de même qu'il n'existe aucune technique standard d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines, ce qui rend difficile la comparaison des diverses évaluations. En effet, la notion de vulnérabilité des eaux souterraines n'est pas une propriété absolue mais un indicateur complexe (Maxe et Johansson, 1998) et le manque d'unicité dans la définition ou plutôt le manque d'acceptation d'une définition du terme «vulnérabilité des eaux souterraines », contribue à la complexité de cette notion.

Le concept de vulnérabilité peut se définir à 3 niveaux :

- aptitude d'un système d'eaux souterraines à être contaminé ;
- intégration de l'aptitude des eaux souterraines à propager et à conserver la contamination ;
- prise en considération des caractéristiques polluantes du contaminant ce qui fait appel aux concepts de normes et de seuils de toxicité. (Lafrance *et al.*, 1989).

Pour être plus précis le terme de vulnérabilité regroupe deux idées :

1) La vulnérabilité intrinsèque, qui fait intervenir les conditions physiques naturelles du milieu. Selon les auteurs on parlera de vulnérabilité intrinsèque (Vrba et Zaporozec, 1994), de sensibilité (EPA, 1993) ou encore de susceptibilité à la contamination. Plusieurs définitions peuvent convenir à cette notion (Tableau 1), celle déterminée par Vrba et Zaporozec est complète et simple, c'est celle qui sera retenue ici.

Tableau 1 : Définitions de la vulnérabilité intrinsèque.

Civita, (1990)	Aubre (1992)	EPA, (1993)	Vrba et Zaporozec, (1994)
C'est l'aptitude d'un aquifère à absorber ou à diffuser un polluant transporté par l'eau	C'est la facilité qu'offre un terrain à la pénétration jusqu'à la nappe d'eau souterraine, d'une contamination provenant de la surface du sol. Cette notion ne fait intervenir que des conditions hydrogéologiques du site sans tenir compte des propriétés d'un éventuel contaminant.	C'est une fonction des caractéristiques intrinsèques de l'unité hydrogéologique sans considération du comportement et des propriétés de contaminants particuliers	C'est une propriété intrinsèque des systèmes aquifères qui dépend de la sensibilité qu'ont ces systèmes, aux impacts humains et naturels

2) La vulnérabilité spécifique, qui fait intervenir non seulement les paramètres naturels, mais également les propriétés relatives au contaminant (nature, mise en place), aux activités humaines ou mêmes aux populations à risque. Selon les auteurs on parlera de vulnérabilité spécifique (Vrba et Zaporozec, 1994) ou vulnérabilité (EPA, 1993) ou évaluation du risque. D'après Aubre (1992), il s'agit de l'évaluation du danger de contaminer les eaux souterraines. Cette évaluation peut se

faire en combinant la vulnérabilité des eaux souterraines du site avec les risques de déversements au sol inhérents à certaines activités humaines ou encore en tenant compte de l'impact spécifique d'un contaminant sur un milieu géologique particulier. En effet, un même contaminant peut réagir de manière différente selon le milieu tout comme certains contaminants réagiront différemment au contact d'un même milieu du fait de la variabilité des propriétés physico-chimiques des substances chimiques (Vrba et Zaporozec, 1994). Ainsi, selon le contaminant pris en considération, il y aura accroissement de la vulnérabilité ou, au contraire, diminution selon que les capacités d'atténuation des matériaux géologiques ont été augmentées par l'introduction du contaminant ou pas (Vrba et Zaporozec, 1994). Certaines méthodes répertorient les différents types de contaminants leur affectant un indice selon leur capacité d'atténuation et de dégradation, c'est le cas de la méthode modifiée de Civita (1997) (Tableau 2). La notion de vulnérabilité spécifique fait alors intervenir la notion de risque de contamination.

Tableau 2 : Index des dangers de contamination (modifié de Civita & De Maio, 1997)

DCI	Industrie	Élevage de bétail	Autre sources ponctuelles	Agriculture
9	* Produits chimiques et dérivés * Industries de raffinage de pétrole et industries connexes (entreposage de substances toxiques et/ou nocives en quantité importantes)		* Évacuation des déchets toxiques et/ou dangereux non répertoriés.	
8	* Cuir et produits du cuir * Technologie galvanique		* Réservoirs de stockage de déchets toxiques et/ou dangereux	
7	* Ingénierie et métallurgie		* Évacuation de déchets solides urbains (USW) (ou assimilable)	
6	* Papiers et produits apparentés * Produits du textile			* Cultures en pépinières ou serres * Culture avec support chimique important
5	* Produits alimentaires variés (boisson, tabac, sucre etc...)	* Élevage intensif de porcs, volailles et lapins avec plus de 500 quintaux de masse de production		* Culture avec support de produits chimiques limité et avec épandage d'engrais de porcs et lapins
4	* Nourriture et produits de même nature	* Élevage intensif de moutons/chèvres et élevage de chevaux * Piscicultures importantes	* Décharge interceptant le niveau piézométrique	
3		* Bétail intensif de plus de 50 unités	* Autoroute à trafic important	* Cultures avec support chimique et épandage d'engrais de bestiaux limités
2		* Ferme générique ou cheptel sauvage		* Cultures (fruits, champs de vigne ou graines) avec un support chimique limité (régulation CEE 2078/92)
1			* Décharge de montagne ou colline qui n'intercepte pas le niveau piézométrique	* Pâturage * Cultures qui ne nécessitent pas de traitement

DCI : Danger Contamination Index (Index de danger de contamination) :

Cet index permet de passer outre une évaluation probabiliste d'événements de contamination qui, dans le cas de l'eau souterraine, ne peut être proposée.

La variabilité de 1 à 9 pour le DCI maintient la classification proposée par l'USEPA en 1978 et Mazurek en 1979 pour les activités industrielles et pour trouver les points de connexion avec les activités zootechniques et les sources diffuses.

La notion générale de vulnérabilité peut s'expliquer par le fait que si un aquifère nécessite un degré majeur de protection par rapport à un polluant répandu à la surface, l'installation d'infrastructures ou d'activités humaines, sources de pollution, constituent alors un degré majeur de risque (Bencini et al., 1995). La protection des eaux souterraines est une tâche complexe et le développement de programmes de protection de ces eaux est un exercice difficile. Ainsi, la première étape pour cette étude a été de déterminer si l'estimation de la vulnérabilité aux sources de polluants potentiels doit faire intervenir le risque et la probabilité de contamination. Ceci en sachant que l'évaluation de la vulnérabilité spécifique fait intervenir une grande quantité de paramètres et donc de données, dont la compilation peut s'avérer laborieuse et le traitement complexe et coûteux. Ce type d'étude vise à évaluer l'impact d'activité à l'échelle locale. Le concept considéré dans cette étude, est par conséquent celui de la vulnérabilité intrinsèque.

1.2 Évaluation de la vulnérabilité

La vulnérabilité est un concept mal défini et difficilement quantifiable de manière absolue. Par contre elle peut être exprimée sous forme de concepts hydrogéologiques. En effet, d'après Margat (1991), elle est appréciée suivant deux critères : la facilité avec laquelle un fait polluant pourra porter atteinte à la qualité de l'eau et la difficulté et la lenteur de régénération des qualités de l'eau souterraine. Quelle que soit la méthode, la notion de vulnérabilité intègre les différents facteurs physiques déterminant le degré d'exposition des nappes à la pollution à partir de la surface du sol (Albinet et Margat, 1970) (Tableau 3).

Tableau 3 : Récapitulation des éléments à prendre en compte (tiré de Albinet et Margat, 1970)

Variables	<i>Importance :</i>			
	a. facteur primordial considéré en priorité		b. facteur secondaire considéré inégalement.	
	Facteur de défaut de défense, de faible protection naturelle		Facteur de "résilience", de capacité et rapidité de régénération	
	Importance	Sens	Importance	Sens
Structurales				
- Extension de la surface libre par rapport à l'étendue totale de l'aquifère	a	direct	b	direct
- Perméabilité du sol et de la formation de couverture	b	direct		
- Porosité de la formation de couverture	b	direct		
- Transmissivité moyenne de l'aquifère	b	direct (1)	b	direct
Hydrodynamiques				
- Profondeur de la surface libre (hauteur de la zone saturée) en moyenne	a	inverse (2)		
- Recharge moyenne par unité de surface	b	inverse	a	direct
- Durée de transit (temps de séjour) de l'eau infiltrée en zone non saturée.	a	inverse (2)		
- Durée de renouvellement (ratio volume d'eau total/flux moyen d'apport) = temps de séjour moyen.			a	inverse
Hydrochimiques ou biochimiques				
- Richesse des formations de la zone non saturée en minéraux à capacité d'échange (adsorption)	a	inverse (3)		
- Potentiel de décomposition chimique ou de biodégradation des polluants dans le sol	a	inverse (3)		

Notes :

(1) Facteur de propagation d'un polluant dans l'aquifère à partir d'une source localisée.

(2) Dans la mesure où une courte distance et une courte durée de transit réduisent la possibilité d'atténuation de la concentration en polluant à l'entrée dans l'aquifère, à partir d'une source superficielle temporaire.

(3) Facteur très spécifique à la nature des polluants

Les cartes de vulnérabilité sont basées sur l'existence de processus d'atténuation des contaminants à l'intérieur des sols et matériaux constituant les diverses unités du sous-sol (Vrba et Zaporozec, 1994) et donc *a fortiori* sur l'estimation de facteurs structuraux ou dynamiques de défense et de résistance naturelle et de la capacité à résorber ou régénérer la qualité dégradée. Ce peut être des facteurs naturels variés comme la texture, l'épaisseur, la conductivité hydraulique ou de facteurs secondaires (ou déduits), appelés attributs, tels que la recharge ou l'infiltration, le sol, la zone vadose, les propriétés des aquifères. La vulnérabilité prend également en compte des attributs tels que la topographie, les sous unités de l'aquifère, le contact avec la surface et l'eau de mer. D'après Vrba et Zaporozec (1994) les paramètres principaux généralement pris en compte lors de l'évaluation de la vulnérabilité sont : le type de sol, la zone vadose, le type d'aquifère et la recharge. Les paramètres secondaires pris en compte sont : la topographie et la couche géologique sous-jacente à l'aquifère.

Afin de mieux comprendre et décrire les phénomènes de transport et d'écoulement vers et dans les eaux souterraines et donc d'évaluer la vulnérabilité de manière significative, il est essentiel de déterminer les processus et propriétés propres aux milieux et donc les facteurs intervenants dans la migration des polluants jusqu'à la nappe. Cela permet de savoir ce que représente chaque paramètre d'une méthode en terme de processus et de propriétés du milieu et d'estimer la redondance des facteurs et de mettre en évidence la différence d'évaluation d'un paramètre selon la méthode.

1.2.1 Intervention des différents processus et propriétés selon la zone concernée.

Les processus et propriétés du milieu sont la base de l'estimation de la vulnérabilité. Ici sont présentés les principaux processus et propriétés, et les principales définitions s'y référant. Selon que l'on est à la surface, dans le sol, dans la zone non saturée ou saturée, les processus et propriétés n'interviennent pas de la même manière. Chaque processus prédomine dans une zone en particulier. Ainsi, la figure 1 permet un bref récapitulatif des propriétés de chacune des zones ainsi que les processus rattachés à ces milieux.

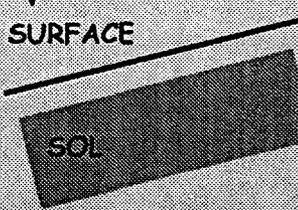
ZONES	PROPRIÉTÉS	PROCESSUS
↓ Bilan hydrologique SURFACE 	Pente Porosité/Perméabilité Texture/Structure Épaisseur Pourcentage d'argile Matière organique Composition	Infiltration Ruissellement Filtration Biodégradation Sorption Volatilisation Complexation
ZONE NON SATURÉE	Épaisseur Capillarité perméabilité relative	Biodégradation Volatilisation Neutralisation Hydrolyse Oxydo-réduction Dispersion verticale Désintégration radioactive
ZONE SATURÉE	Porosité effective Conductivité hydraulique Lithologie Direction d'écoulement	Dilution Transformations biochimiques

Figure 1 : Les différents processus et propriétés et la zonation hydrogéologique

Chacun de ces processus et propriétés ont des définitions qui leur sont propres. Les Tableaux 4 et 5 présentent de manière succincte et simple ce que signifient ces différentes caractéristiques du milieu et ce qu'il est important de retenir.

Tableau 4 : Définitions et remarques concernant les principaux processus.

Processus	Définitions et remarques
Filtration	Les substances associées à des particules colloïdales sont retenues lors de leur passage dans les pores de faible dimension. Cela entraîne une réduction de la masse surtout dans les milieux riches en argile.
Advection	Processus qui permet la migration de soluté résultant de l'écoulement de l'eau souterraine. C'est un mouvement induit par un gradient hydraulique. Elle décrit la migration d'un soluté à une vitesse moyenne. Le flux advectif est un flux macroscopique défini sur un volume élémentaire représentatif (VER).
Sorption	L'échange d'ions peut retenir des cations à la surface des particules d'argile ou d'autres matériaux colloïdaux. La quantité de cations métalliques adsorbés augmentera avec l'augmentation de pH. Il résulte une accumulation de produits au niveau d'une interface ou dans une phase.
Solution et volatilisation des gaz	Le mouvement des gaz favorise la dégradation aérobie des substances organiques et augmente leur taux de décomposition. Si le mouvement est réduit par des zones peu perméables, un état anaérobie peut se développer et réduire le taux de décomposition (les substances solubles seront mobilisées).
Écoulement immiscible	L'effet combiné des propriétés capillaires des milieux poreux, des effets de mouillabilité et de tension interfaciale provoque une rétention d'une partie du fluide immiscible lors de son déplacement.
Oxydation/réduction	Plusieurs éléments ont plus d'un état d'oxydation. Ces conditions sont identifiées grâce à des diagrammes de Pe-pH. La précipitation diminue la solubilité en zone saturée et où la matière organique est en excès.
Réactions acides/bases	Un pH réduit favorise le transport de la plupart des éléments chimiques, du fait de l'augmentation de la solubilité des constituants à pH réduit.
Complexation	C'est une combinaison d'ions qui normalement existent séparément dans une solution. Le phénomène s'accroît avec la concentration. Cette propriété permet d'augmenter la solubilité de certains éléments (tels que les métaux) dans l'eau.
Biodégradation	Réaction biochimique qui se fait par intermédiaire de micro-organismes. En général un composé organique est oxydé par un accepteur d'électron qui lui réduit. En condition aérobie, c'est l'oxygène qui joue le rôle d'accepteur d'électron, et en condition anaérobie les micro-organismes utilisent les composés organiques chimiques ou les anions inorganiques comme accepteur d'électrons.
Dispersion hydrodynamique	La dispersion hydrodynamique représente l'addition, superposition de la dispersion mécanique et de la diffusion moléculaire. L'effet de ces deux processus sur le transport est le même, ils contribuent à l'étalement du soluté.
Bilan d'infiltration hydrologique	L'eau entre dans le système par infiltration, la quantité d'eau qui entre dans le système peut être déterminée en calculant le bilan hydrologique.
Radioactivité et Hydrolyse	L'hydrolyse diminue la masse des composés organiques par l'addition d'un groupe OH à ce composé, ce qui le rend plus soluble et mieux biodégradable.
Les tampons et la Neutralisation	Réactions chimiques similaires. La neutralisation c'est la production d'une solution neutre grâce au pH ou à l'activité de l'ion hydrogène. La neutralisation d'un acide ou d'une base produit de l'eau et des sels neutres. La chaux est efficace dans la neutralisation des déchets acides.
Précipitations	Les précipitations constituent l'apport principal d'eau au sol et permettent le calcul des quantités d'eau qui s'infiltrent et ruissellent chaque jour (AGEOS-INRS-eau, 1996-1997).
Infiltration	L'infiltration représente le passage lent d'un liquide à travers les interstices d'un corps. C'est la quantité d'eau qui pénètre dans le sol par percolation. (Petit Larousse illustré, 1995).
Ruissellement	Quantité d'eau qui reste et s'écoule à la surface du sol.

Tableau 5 : Définitions et remarques concernant les principales propriétés

Propriétés	Définitions et remarques
Porosité / densité	La porosité d'un matériel est directement reliée à sa densité. La densité c'est la quantité de masse contenue dans un volume unitaire.
Saturation	La saturation d'un milieu c'est la teneur en eau maximum que peut contenir un matériau. La saturation est une propriété, en général, reliée au processus d'infiltration.
Pente	Le taux de ruissellement et donc d'infiltration d'eau dans le sol varie en fonction de l'inclinaison du terrain. Une faible pente permettra une infiltration plus efficace.
Capillarité	C'est l'ensemble des phénomènes physiques qui se produisent à la surface d'un liquide. (Petit Larousse illustré, 1995).
Perméabilité	C'est la mesure de la capacité d'un milieu poreux à transmettre un fluide qui le sature complètement.
Perméabilité relative	Propriété représentative du milieu poreux uniquement. De manière empirique la perméabilité intrinsèque (k) est donnée par le produit d'un facteur de forme (C) par le diamètre moyen des pores (d) au carré.
Transmissivité	Mesure de la quantité d'eau qui peut être transmise horizontalement par toute l'épaisseur saturée de l'aquifère sous un gradient hydraulique de 1. La transmissivité T est le produit de la conductivité hydraulique K et l'épaisseur saturée de l'aquifère b. (Lefebvre, 1997).
Mouillabilité	Attirance relative des fluides pour les surfaces solides des milieux poreux. Tendance relative d'un fluide à s'étendre ou à adhérer à une surface solide en présence d'un autre fluide immiscible (Lefebvre, 1997).
Tension interfaciale	Énergie (travail) requise pour créer une nouvelle unité de surface à l'interface entre deux fluides immiscibles (Lefebvre, 1997).
Température du sol/air	La température du sol influence les vitesses de réactions biochimiques du cycle de l'azote, des transformations des hydrocarbures et des pesticides. Il est donc nécessaire de les connaître de façon journalière. L'identification des deux jours (automne et printemps) où la température de l'air passe par le point de congélation est nécessaire pour effectuer l'accumulation et la fonte de neige (AGEOS et INRS-Eau, 1996-1997). L'activité bactérienne est plus importante avec des températures plus élevées.
L'emmagasinement	L'emmagasinement spécifique (Ss) c'est la quantité d'eau par unité de volume d'une formation saturée qui est emmagasinée ou libérée pour une variation de charge hydraulique unitaire, à cause de la compressibilité du squelette de l'aquifère et de l'eau des pores. Le coefficient d'emmagasinement (S) pour une nappe captive est le produit du coefficient d'emmagasinement spécifique Ss par la hauteur saturée b de l'aquifère (Gélinas et al., 1997).
Atténuation	L'atténuation inclut les mécanismes qui réduisent la vitesse du contaminant à travers les processus tels que la dilution, dispersion... Le degré d'atténuation est fonction du temps de contact du contaminant avec le matériel qu'il traverse, de la taille des grains et des caractéristiques physiques et chimiques du matériel qu'il traverse, de la distance que le contaminant a parcouru. (Aller et al., 1987) Il peut s'agir du prélèvement d'azote par les racines (AGEOS et INRS-Eau, 1996-1997).

1.2.2 Relations des processus avec les paramètres

Toutes les caractéristiques du milieu et des fluides ne peuvent être prises en compte par une méthode. L'objectif de l'estimation de la vulnérabilité est de prendre en considération les principales caractéristiques, celles qui représentent le mieux et le plus justement le milieu. Un paramètre permet de mettre en évidence une caractéristique du milieu propre aux processus et propriétés qui s'y réfère mais, d'une méthode à l'autre, un paramètre n'est pas toujours évalué de la même manière. Cette section permet de définir, pour les paramètres les plus souvent utilisés, les notions qui interviennent dans leur évaluation.

Recharge

Il s'agit d'une notion complexe qui fait intervenir un grand nombre de processus et de propriétés du milieu. L'estimation se fait sur une année. Mais ni la recharge ni l'application de contaminants ne sont constantes dans le temps, l'estimation annuelle entraîne donc une mauvaise estimation de la vulnérabilité. La recharge se fait, en milieu non confiné, de manière saisonnière, et subit les influences climatiques (Freeze et Cherry, 1979). Ce paramètre est déterminé en fonction du taux de **précipitation** qui s'**infiltre** et percole vers la **surface libre**. Un contaminant est transporté verticalement jusqu'à la surface de la nappe. Plus la recharge est importante plus la possibilité de pollution de la nappe est importante (de part le processus d'**advection**). Ce paramètre contrôle également la **dispersion** du contaminant à travers la zone vadose et la zone saturée.

Caractéristiques/type de sol

Le sol représente la partie supérieure de la zone non saturée et est caractérisé par une activité biologique significative. La capacité à atténuer et faire migrer le contaminant change en fonction du type de sol. En effet, la composition, la texture et la structure des sols sont trois propriétés qui influencent l'intensité des processus d'atténuation (Aller *et al.*, 1987; Fagnan, 1998). Ainsi, il ne suffit pas de savoir qu'un sol est argileux pour affirmer que l'infiltration de contaminant est moindre, il faut également déterminer le degré de cohésion, la présence de fissures et de micro-organismes (source de macropores) (Vrba et Zaporozec, 1994). Lorsque le sol est épais, les processus de **filtration**, **biodégradation** (important du fait de la **température**, la présence de **matière organique** et d'**oxygène**), **sorption** et **volatilisation** peuvent être significatifs (prise en compte d'un certain *facteur de retard*). Les **composés humiques** sont particulièrement responsables de l'**adsorption** et des mécanismes de **complexation**. Le sol a également un impact

sur la recharge puisque si les propriétés du sol ne se prêtent pas à l'**infiltration**, il n'y a pas de recharge.

Profondeur à la nappe

Ce paramètre détermine l'épaisseur de matériaux que doit traverser un contaminant avant d'arriver à la nappe. Il permet de déterminer le temps de contact avec le milieu et donc l'influence du milieu et l'efficacité des processus chimiques, de dégradation et d'atténuation d'un contaminant. Le milieu va déterminer le temps de passage des fluides de part ses caractéristiques et la profondeur à laquelle se situe la nappe. C'est le long de cette zone que les processus de **sorption**, de **dispersion**, de **filtration**, de **biodégradation**, et d'**oxydation-réduction** vont avoir lieu donc plus cette zone est grande plus le temps de passage sera long. De plus, les propriétés du milieu telles que la **perméabilité relative** des horizons traversés la **porosité**, la **hauteur de sol**, la **hauteur de la zone non saturée** vont interagir avec ces processus.

Topographie

Le terme de topographie fait référence à la pente et à la variation du niveau de la pente de la surface du sol. Souvent le gradient et la direction d'écoulement peuvent subir une influence due à la pente. La topographie influence le *développement des sols* donc indirectement l'importance de l'**atténuation** d'un contaminant par le sol. Les pentes qui procurent des conditions favorables à l'**infiltration**, et donc un faible **coefficient de ruissellement** des polluants (surface importante, peu de pente) seront considérés comme fortement vulnérables.

La zone vadose

La zone vadose est définie comme la zone au-dessus de la surface libre qui n'est pas saturée entièrement, et de manière continue. La délimitation de la zone vadose dépend du type d'aquifère. Le type de zone vadose (type de **matériaux**, **porosité**...) détermine les **capacités d'atténuation** du milieu. Les processus qui peuvent intervenir dans cette zone sont tous les processus de **neutralisation**, **filtration**, **réactions chimiques (acides/bases)**, **dispersion**, **volatilisation** et **biodégradation**. D'après Vrba et Zaporozec (1994), les principaux facteurs influençant l'atténuation des contaminants dans la zone vadose sont le **type de matériel**, la **perméabilité verticale**, et l'**épaisseur** de la zone vadose. Enfin, d'après Aller *et al.* (1987), le type de matériel règle l'adsorption du milieu (une grande surface de réaction d'un matériel fin rend l'adsorption plus forte), la perméabilité verticale détermine la rapidité du contaminant à atteindre la nappe et l'épaisseur influence l'arrivée du contaminant à la nappe. Il est à noter que l'effet des processus

d'atténuation des contaminants s'affaiblit avec la profondeur (Vrba et Zaporozec, 1994 ; Aubre, 1992 ; Fagnan, 1998).

Type d'aquifère

D'après Vrba et Zaporozec (1994), ce paramètre réfère aux **matériaux** de l'aquifère, à la **porosité effective**, à l'**épaisseur** et au **type d'aquifère** (confiné ou non). Le système d'écoulement est affecté par le milieu. Selon la **taille** des grains, l'**agencement** des grains, les **propriétés chimiques** des grains, la taille des pores, le chemin d'écoulement suivi sera différent, la **conductivité hydraulique** et les **gradients** également. De même, la **perméabilité** du milieu intervient sur la rapidité du contaminant à migrer. Ainsi, elle affecte les processus d'**atténuation**, de **transport par advection** et le **temps** disponible pour les phénomènes tels que la **sorption**, les **réactions acides/bases** et la **dispersion**.

Conductivité hydraulique

Cette notion réfère à la capacité des matériaux de l'aquifère à transmettre l'eau. La conductivité hydraulique est contrôlée par l'**interconnexion des espaces vides** dans l'aquifère qui peut être une conséquence de la **porosité intergranulaire**, des **fractures**...

Matériaux géologiques

Les matériaux géologiques constituent les dépôts stratifiés et non stratifiés et incluent le sol. Deux propriétés des matériaux géologiques sont essentielles pour l'évaluation de l'eau affectée et le mouvement des composés : la quantité de **matière organique** présente, et la **conductivité hydraulique**. Beaucoup de méthodes de mesure de la conductivité de matériaux géologiques contenant des macropores fournissent une mesure combinée de la porosité de la matrice et des macroporosités ce qui surestime le mouvement vertical de l'eau et des composés à travers le matériau. Des mesures récentes ont montré que l'eau et les composés voyagent mieux à travers des pores et des plantes qu'à travers des pores et des éléments de sol.

Le bilan hydrologique

Le bilan hydrologique permet de connaître le flux d'eau qui reste dans le milieu. Il fait intervenir un certain nombre de propriétés et de processus qui s'agencent de la manière suivante (Figure 2) :

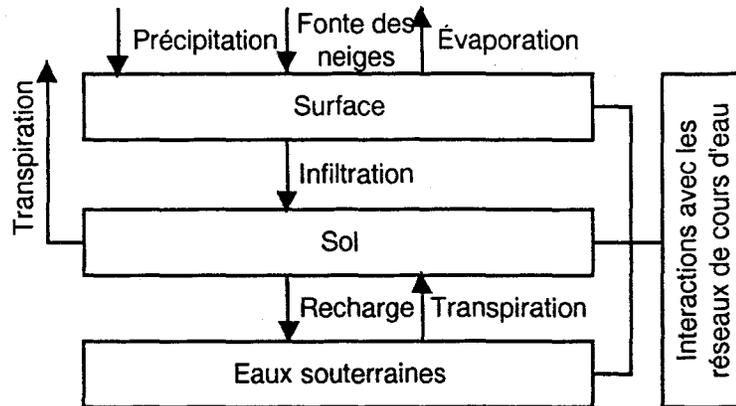


Figure 2 : Bilan hydrologique (modifiée à partir de Domenico et Schwartz, 1990)

Caractéristiques se référant aux propriétés chimiques

En règles générales les méthodes spécifiques nécessitent l'utilisation de caractéristiques chimiques. Pour les modèles de vulnérabilité intrinsèque, les propriétés chimiques sont prises en compte en assumant que le contaminant a les caractéristiques de l'eau.

Remarque: Les propriétés physico-chimiques sont utiles dans le cas où l'estimation de la vulnérabilité se fait sur un contaminant en particulier. D'après Fetter (1993) l'étude des propriétés physico-chimiques ainsi que celle de la dynamique de propagation des contaminants non solubles est préalable à l'élaboration d'hypothèses concernant l'éventuel impact des processus d'atténuation dans les aquifères pour un contaminant particulier.

Drainage

Le drainage artificiel de l'eau est une composante importante du bilan hydrologique pour de nombreux sols agricoles. Le drainage agricole vise généralement à rabattre la nappe d'eau souterraine sous la zone racinaire afin d'allouer une aération suffisante pour les plantes. Le calcul du drainage doit représenter le rabattement de la nappe et permettre l'évaluation des flux d'eau. Il doit aussi tenir compte de l'écoulement vers la nappe profonde d'une partie de l'eau d'infiltration (AGEOS et INRS-Eau, 1997).

Taille de l'aquifère

La taille de l'aquifère est une caractéristique peu utilisée, pourtant un aquifère épais de grande étendue favorisera l'atténuation des contaminants solubles grâce au processus de dilution (Vrba et Zaporozec, 1994; Fagnan, 1998).

1.2.3 Remarque.

Les paramètres décrits dans cette section sont relatifs à la vulnérabilité intrinsèque. Il est cependant intéressant de noter que selon les types de contaminants, la capacité de dilution du milieu n'a pas le même impact sur l'évaluation de la vulnérabilité. Ainsi, si un contaminant soluble se propage à l'intérieur d'un aquifère épais et de grande étendue, il pourra être efficacement dilué (Aller *et al.*, 1987). Par contre, dans un contexte où le contaminant est peu soluble, l'étalement de celui-ci à l'intérieur d'un vaste aquifère aurait pour effet d'amplifier l'étendue de la contamination et d'augmenter les difficultés de la remédiation du site (Fetter, 1993; Fagnan., 1998). Dans la plupart des méthodes d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque, les caractéristiques prises en compte sont celles de l'eau. Il n'est alors pas possible de tenir compte de la densité du contaminant. Le gradient hydraulique régit la direction de l'écoulement et détermine si la contamination de l'aquifère s'effectue en surface ou en profondeur, mais le gradient hydraulique est difficile à établir de manière régionale et c'est donc rarement un paramètre de vulnérabilité intrinsèque.

1.3 Classement des méthodes et revue de littérature

1.3.1 Place des cartes de vulnérabilité dans le schéma de classification environnemental.

Les cartes de vulnérabilité sont des cartes de protection interprétatives dérivées des cartes hydrogéologiques régionales (d'après Zaporozec, 1989 dans Vrba et Zaporozec, 1994). Elles diffèrent des cartes hydrogéologiques dans le sens où elles ne montrent pas les éléments des systèmes d'eaux souterraines, mais les caractéristiques spécifiques de ces éléments intervenant dans la vulnérabilité des eaux souterraines (Vrba et Zaporozec, 1994). Elles s'intègrent en général dans les systèmes de classification cartographique comme cartes de protection et de gestion. Mais les cartes peuvent être classifiées de différentes manières et plusieurs critères peuvent être appliqués à la classification des cartes environnementales. Vrba et Zaporozec (1994) montrent que des auteurs comme Vrana (1981) basent la classification sur l'échelle de réalisation de la carte. D'autres comme Freitag (1989) placent les cartes de vulnérabilité dans les cartes en série présentant des informations variables. Wang (1989) quant à lui classifie les cartes de vulnérabilité comme carte d'évaluation. Zaporozec (1989) inclut les cartes de vulnérabilité comme une subdivision des cartes de protection. Le Tableau 6 présente la place que prennent les cartes de vulnérabilité en cartographie selon Struckmeier (1989). Ce sont des cartes de problèmes orientés ou cartes spécialisées dérivées de cartes hydrogéologiques générales. Struckmeier (1989) classifie

les cartes de vulnérabilité comme des cartes statiques, de fiabilité et de niveau d'information faible, souvent à petite échelle et utilisées à des fins de gestion et de protection.

Tableau 6 : Système de classification des cartes hydrogéologiques selon Struckmeier (1989)

Utilisation possible	Niveau d'information	Faible (informations de sources variées, peu nombreuses et hétérogènes)	Avancé (programmes d'investigation + systématiques, informations plus fiables)	Fort (+ de systèmes d'analyse hydrogéologiques et de modèles d'eaux souterraines)
		Reconnaissance et exploration	Cartes hydrogéologiques régionales (cartes des aquifères)	Cartes des paramètres hydrogéologiques (recueil de cartes, atlas)
Utilisation possible	Plan et développement	Cartes des ressources potentielles en eaux souterraines	Cartes hydrogéologiques spécialisées (cartes de planification)	Représentation graphique dérivée des systèmes d'information géographiques (cartes, sections, diagrammes perspectives, scénarios)
	Gestion et protection	Cartes de vulnérabilité des eaux souterraines		
Utilisation possible	Paramètres de représentation	<i>Dépendance au temps</i>		
		Statique	—————→	Dynamique
		<i>Fiabilité</i>		
		Faible	—————→	Forte
		<i>Coût par unité d'aire</i>		
Faible	—————→	Forte		
<i>Aire représentée</i>				
Large	←—————	Petite		
<i>Echelle</i>				
Petite	—————→	Large		

1.3.2 Classements des méthodes par groupe

Il existe diverses classifications des méthodes de vulnérabilité, cela peut, par exemple, être selon la démarche utilisée. Divers auteurs ont proposé leur classement par groupes et sous-groupes de méthodes (Tableau 7). Celle retenue dans cette étude est celle de Vrba et Zaporozec (1994), classant les méthodes en méthodes intrinsèques et spécifiques.

Tableau 7 : Diverses classifications possibles des méthodes en groupes et sous-groupes

Auteur	Grands groupes	Sous-groupes
<i>R. Fréchette (1987)</i>	<u>Modèles déterministes fondamentaux</u> (ensemble d'équations complexes et détaillées décomposant processus de base de la contamination en termes fondamentaux et mécanistiques)	
	<u>Modèles de types conceptuels</u> (simplification analogique du système naturel)	
	<u>Modèles empiriques simples</u>	Méthodes pionnières Systèmes de cotation numérique Sources de rejets ponctuels intégration des 3 catégories précédentes
<i>EPA (1993)</i>	<u>Méthode d'estimation de sensibilité des aquifères</u>	Classification des unités cotations numériques
	<u>Méthode d'estimation de la vulnérabilité</u>	Application (sensibilité+quantité pest) modèle de simulation filtration(prop phys+fact. pest.)
<i>Vrba/Zaporozec (1994)</i>	<u>Vulnérabilité intrinsèque</u>	Systèmes cartographiques Systèmes de cotation numérique Systèmes analytiques
	<u>Vulnérabilité spécifique</u>	Systèmes analytiques Modélisation
<i>F. Aubre (1992)</i>	<u>MEV (Evaluation de la vulnérabilité)</u> Subdivision selon nature du résultat :	Indice concentration probabilité
	<u>MER (Evaluation du risque)</u> Evaluation qualitative ou quantitative des impacts défavorables à la santé humaine (évaluat. vuln., propag cont., analyse effet cont.)	

1.3.3 Introduction à la technique de classification

Dans cette partie, une revue de littérature de différentes méthodes existantes a été réalisée. Les principales caractéristiques et références seront spécifiées en Annexe I. Les types de méthodes de vulnérabilité sont classés en fonction des procédures :

- A) Les méthodes contextuelles ou cartographiques qui évaluent la vulnérabilité des eaux souterraines par les contextes hydrogéologiques présents, ceux-ci étant pris comme représentatifs des conditions de vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994) (e.g. la méthode développée par le département des ressources naturelles du Minnesota).
- B) Les méthodes des systèmes paramétriques utilisent également les caractéristiques du milieu comme paramètres, mais à chacun d'eux est assigné une valeur numérique. L'introduction d'un système de cotation numérique pour chaque classe de paramètre permet d'évaluer les variations de la vulnérabilité (e.g. DRASTIC, GOD).
- C) Les méthodes analytiques et de modélisation numérique qui permettent de simuler le transport et l'écoulement de fluides vers et dans l'eau souterraine à l'aide d'équations mathématiques (e.g. EVARISK, SEEPW).

Cette technique de classification met en évidence la progression du développement de techniques pour la détermination de la vulnérabilité qui va de la superposition cartographique à la réalisation de modèles numériques en passant par l'intégration des SIG pour la réalisation de cartes mises à jour régulièrement.

1.3.3.1 Méthodes contextuelles

Les premières cartes de vulnérabilité intrinsèques réalisées, dans les années 1960, le furent par des méthodes contextuelles. Ce type de méthode estime la sensibilité d'un aquifère en déterminant des sous zones de sensibilité similaire en se basant sur les facteurs hydrogéologiques. L'objectif est de donner un aperçu visuel de la variabilité spatiale de la protection naturelle des aquifères sur de très grands territoires (Fagnan, 1998). Ces facteurs d'ordre hydrogéologique, sont appréciables en se basant sur les connaissances géologiques et hydrogéologiques générales. Les méthodes existantes nécessitent en général au moins deux facteurs hydrogéologiques pour déterminer les unités de sensibilité. Beaucoup de méthodes ont entre deux et cinq classes de sensibilité.

Voici une description sommaire des mécanismes d'utilisation de ce type de méthodes :

- 1) Déterminer la disponibilité des informations pour les facteurs utilisés par la méthode. L'utilisateur doit en cas de manque de données soit modifier la méthode soit en choisir une autre.
- 2) Sélectionner un nombre de classe de sensibilité. La sélection est basée sur le nombre de gestion possible et sur la variété des caractéristiques hydrogéologiques. Il n'est pas nécessaire d'avoir un grand nombre de classes dans le cas où les options pour la gestion sont réduites.
- 3) Séparer les classes de sensibilité pour chaque facteur hydrogéologique. La sélection des facteurs et les valeurs limites sont plus fiables si elles sont données par des experts en hydrogéologie et en pédologie.
- 4) Établir des règles pour définir comment assigner un indice de vulnérabilité à une zone en mixant les indices de chaque facteur clef. Les règles de décision doivent être sélectionnées de manière à être cohérentes avec les besoins de protection, les contraintes d'implémentation et la compréhension des caractéristiques hydrogéologiques.

L'étape la plus importante lors de l'élaboration de telles cartes est la combinaison des informations. L'approche la plus souvent utilisée est la méthode de superposition qui implique la production de plusieurs cartes, chacune étant relative à un paramètre (Vrba et Zaporozec, 1994).

Dans certains cas les facteurs peuvent se recouvrir, ce qui occasionne la redondance de paramètres. Par exemple, inclure comme facteur l'épaisseur de l'aquifère et la perméabilité est redondant par rapport à la transmissivité de l'aquifère.

1.3.3.2 Méthodes des systèmes paramétriques

Ces méthodes sont en fait une extension des méthodes de classification par caractéristiques hydrogéologiques. Elles sont souvent basées sur l'évaluation des facteurs hydrogéologiques. Les résultats de leur application peuvent être présentés sous forme de cartes ou de listes. L'objectif est de réduire les données techniques en une information compréhensible par tous. Bien qu'utilisées pour de grandes zones, ce sont des méthodes applicables à l'échelle d'un champ si les informations disponibles sont assez détaillées et fiables.

Deux points sont à souligner quant aux caractéristiques de ce type de méthode : a) un poids attribué à chaque facteur permet de donner une importance relative à chacun des paramètres, b) un continuum dans la quantification de la sensibilité de l'aquifère facilite la différenciation de protection des sous zones dans la zone d'étude selon leur vulnérabilité relative.

Différentes étapes sont nécessaires à la mise en place de ces méthodes :

- 1) Déterminer la disponibilité des informations pour quantifier les facteurs de la méthode. En cas de manque de données, l'utilisateur doit modifier la méthode ou en choisir une autre;
- 2) Déterminer une cote spécifique à chacun des secteurs de la zone d'étude et ce pour chaque facteur du modèle. Les indices de valeur propres à chaque facteur sont obtenus à la suite de divisions en intervalles par incrémentation;
- 3) Attribuer un poids (prédéfini fonction de son importance dans l'estimation de la vulnérabilité) et différents index (un par zone découpé) à chaque facteur. L'indice et le poids de chaque facteur sont combinés, pour un secteur donné, pour donner une cote relative en fonction de l'importance de ce dernier.
- 4) Combiner les cotes de chaque paramètre pour produire un indice de sensibilité et ce pour tous les secteurs de la zone d'étude. Afin de combiner les résultats de chaque facteur, l'addition ou la multiplication sont appropriées. L'approche multiplicative est souvent utilisée pour faire ressortir l'importance de chaque facteur.

Une des limitations de ce type de méthode réside dans le fait qu'elle n'inclut pas de facteurs particuliers déterminant la sensibilité spécifique d'un aquifère à un polluant. Les caractéristiques hydrogéologiques prises en compte sont bien souvent celles de l'écoulement de l'eau, mais un polluant tel qu'un hydrocarbure n'aura pas les mêmes propriétés et ne s'écoulera pas de la même manière. Enfin, alors que le poids de chaque facteur est destiné à évaluer leur contribution dans l'estimation de la sensibilité, et ainsi rendre cette estimation la plus réaliste possible, la relation exacte entre chaque facteur est mal comprise, ou mal connue.

1.3.3.3 Méthodes analytiques et de modélisation numérique

Les modèles de simulations, basés sur des processus analytiques, sont, dans la plupart des cas, développés pour l'estimation de la vulnérabilité spécifique à un polluant de source diffuse (Maxe et Johansson, 1998).

En effet, le type de pollution et le polluant interviennent sur le rôle que jouent les facteurs dans l'estimation de la vulnérabilité. Ainsi, bien que certaines méthodes analytiques permettent l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque, ces méthodes sont d'autant plus fondées et significatives qu'il s'agit de vulnérabilité spécifique (Margat, 1991). Une des applications fréquentes de ces modèles est la vulnérabilité aux pesticides qui a été évaluée par des modèles de complexité variés allant des modèles fonctionnels simples aux modèles plus compliqués où le flux et les équations de transport sont appliqués parfois de manière stochastique (d'après Jarvis *et al.*, 1995 dans Maxe et Johansson, 1998). Certains types de méthodes tels que les modèles statistiques couplant les informations de qualité des eaux souterraines aux informations hydrogéologiques ou d'utilisation du territoire sont intégrés aux méthodes analytiques car ils constituent une approche possible pour l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (Schleyer, 1994; Maxe et Johansson, 1998).

1.3.4 Revue des méthodes de vulnérabilité

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses, chacun élaborant sa méthode selon ses besoins. L'inventaire d'une soixantaine de ces méthodes (dont 24 de vulnérabilité intrinsèque) a été réalisée (Annexe I). Une synthèse des informations relatives à chacune des méthodes a alors été effectuée (Annexe II) de manière à mettre en évidence les particularités de chaque méthode et surtout les applications auxquelles elles sont destinées de part leur mise en place. Ces tableaux résument pour l'un les particularités de chaque méthode intrinsèque et leur application possible (en terme de milieu), pour l'autre le

type de méthode, l'applicabilité et le type de contaminant pris en considération pour une évaluation de vulnérabilité spécifique. Ces informations peuvent être utiles notamment lors du choix d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité (chapitre 2).

Afin d'aider au recensement des différentes méthodes, divers ouvrages ont été utilisés pour diriger les recherches. Ainsi les mémoires de maîtrise de Aubre (1992) et Fréchette (1987) ont permis de donner une vue d'ensemble des différentes méthodes existantes, les méthodes répertoriées étant pour la plupart des méthodes de vulnérabilité spécifiques. De même si l'ouvrage réalisé par l'EPA (1993) a été conçu en vue d'aider à l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par les pesticides, il s'avère aussi un excellent outil de recherche pour les méthodes de vulnérabilité intrinsèques.

Toutes les méthodes et les cartes réalisés, ne sont pas répertoriés à l'Annexe I. Après lecture de l'ouvrage de Vrba et Zaporozec (1994) on peut notamment remarquer l'absence des cartes élaborées dans les années 1960, 1970 par Vrana en 1968 et 1984 et Olmer et Rezac en 1974 (pour la Tchécoslovaquie), par Tosan et ses collaborateurs en 1975 (pour la France), par Kleczkowski et ses collaborateurs en 1973 et Macioszczyk et Plochniewski en 1979 (pour la Pologne), par Rogovskaya en 1976 (pour la Russie), par Antonov et Rajkova en 1968 (pour la Bulgarie), par Josopait et Schwerdtfeger en 1979 (pour l'Allemagne) et par IGME en 1976 (pour l'Espagne).

Il existe des méthodes d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque, spécifique à un type de site donné. Un répertoire succinct de ce type de méthode a été réalisé en Annexe I, mais ne font pas parti de l'étude en cours.

La multiplicité des méthodes provient aussi bien des objectifs recherchés aux niveaux de la réglementation, des activités humaines, des polluants etc., que du nombre d'organismes qui développent leur propre méthode (Aubre, 1992). En effet, beaucoup de méthodes ont été développées par des agences gouvernementales pour une utilisation spécifique à leur pays, province ou état, ce qui explique le fait que des comparaisons de cartes ne soient généralement pas disponibles (Van Stempvoort *et al.*, 1992). L'élaboration de nouvelles méthodes est souvent basée soit sur la modification de méthodes existantes, en vue de l'obtention d'un outil mieux adapté aux besoins précis d'une étude, comme la méthode développée par le département de la santé et du bien-être de l'Idaho (voir Annexe I) modifiée à partir de DRASTIC (Aller *et al.*, 1987); soit sur la mise au point de méthodes basées sur plusieurs méthodes existantes comme la

méthode SEEPPAGE (de Moore, 1989 dans Bridson *et al.*, 1994) qui provient de la combinaison des méthodes DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) et SCAM (de Zaporozec, 1985 dans Bridson *et al.*, 1994). Les adaptations effectuées pour l'établissement de nouvelles méthodes se résument souvent à la suppression ou l'ajout de paramètres, mais également à la redéfinition d'intervalles de paramètres pour une application dans un contexte différent de celui où elle a été mise au point.

Le développement de tant de méthodes engendre une incompatibilité entre les cartes produites dans divers pays, provinces ou états. Sotornikova et Vrba (1987) puis Vrba et Zaporozec (1994) ont suggéré une standardisation pour la méthodologie, la construction et la classification des cartes de vulnérabilité. Trojan et Perry (1988) par contre, ont effectué une étude portant sur 50 états et ont déterminé qu'étant donné la variabilité des informations pour chaque état, un seul système n'est pas applicable à tous les états et le plus logique serait que chaque état développe sa propre méthode mais avec des limitations dans les systèmes de notation. Dans ce cas, la comparaison des valeurs de vulnérabilité peut se faire si à chaque état est assigné un indice ajusté en fonction du nombre de facteurs utilisé par rapport au nombre de facteurs total qu'il est possible d'utiliser.

En prenant un échantillonnage d'une trentaine de méthodes répertoriées dans la littérature (Tableau 8), il est possible de mettre en évidence ce qui est général, commun à l'ensemble des méthodes tels que les caractéristiques qui reviennent souvent et les grands points qui différencient les méthodes les unes des autres.



(1) Les types de méthodes :

Les objectifs à atteindre sont différents d'un type de méthode à l'autre. D'après Navulur et Engel (1997b), des méthodes comme DRASTIC et SEEPPAGE peuvent être appliqués à l'échelle régionale alors que des modèles d'échelle plus précise comme NLEAP, GLEAMS, PRZM ou RUSTIC peuvent être appliqués à des analyses plus spécifiques sur les secteurs à fort potentiel de contamination.

Il y a diverses manières de voir l'évaluation de la vulnérabilité. Par exemple d'après les concepteurs de la méthode du Minnesota, chaque aquifère nécessiterait une carte séparée qui pourrait être utilisée dans le cadre d'un programme de protection de l'aquifère.

(2) Le nombre de paramètres :

Selon la méthode utilisée, le nombre de paramètres n'est pas le même. Il est rarement supérieur à 7 et se situe le plus souvent entre 3 et 4.

Une méthode qui utilise un nombre important de paramètres, ne nécessite pas forcément plus d'informations qu'une autre. En effet, si on prend l'exemple de DRASTIC, SCAM, AVI et Roeper, les deux premières méthodes utilisent 7 paramètres. Les 7 paramètres de SCAM font références au sol, alors que ceux de DRASTIC sont plus diversifiés, mais le paramètre sol ne fait pas intervenir toutes les caractéristiques faisant référence au sol. Bien que les méthodes AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1992) et Roeper (Van Stempvoort *et al.*, 1992) n'utilisent respectivement que 2 et 1 paramètres, l'estimation de ces paramètres nécessite des informations sous forme condensée. La méthode Roeper utilise comme paramètre la profondeur de la couche confinante, une subdivision arbitraire dans les épaisseurs définie des zones de vulnérabilité. La méthode AVI considère l'épaisseur de chaque couche sédimentaire et la conductivité hydraulique, chaque valeur moyenne de conductivité étant corrélée à un type d'unité stratigraphique (ce qui donne une information sur le type de sol, le type de la zone vadose et même des différentes couches de la zone vadose et le type d'aquifère).

D'une méthode à l'autre, l'emphase n'est pas toujours mise sur les mêmes paramètres. Pour Vrba et Zaporozec (1994) les facteurs les plus importants sont les sols, la zone vadose, le type d'aquifère et la recharge. Pour De Smedt (1987), la vulnérabilité s'estime par les dimensions et la nature des aquifères et des formations de couverture, les propriétés hydrauliques des formations, le comportement de l'eau souterraine dans les conditions naturelles ou non, les interactions entre

les formations adjacentes, la nature et l'extension de la contamination (Cf. Annexe I). Maxe et Johansson (1998) quant à eux utilisent des paramètres qui ne sont pas souvent utilisés pour l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque. Il s'agit des caractéristiques hydrogéologiques, de la capacité de rétention (distribution de la taille des grains en zone non saturée et profondeur à la nappe), du temps de passage des liquides (ce qui inclut la capacité d'infiltration, la vitesse moyenne du flux, le temps de parcours vertical et la présence d'un sol). En fait la méthode AVI utilise les mêmes facteurs que DRASTIC sauf la topographie et la recharge.

(3) Les paramètres :

D'un auteur à l'autre un paramètre peut être déterminé avec des processus et des propriétés différentes. Ce que certains auteurs utiliseront comme paramètres d'autres l'incluront dans la détermination et la mise au point d'un autre paramètre.

Pour la méthode DRASTIC, en assumant que le contaminant a la mobilité de l'eau et qu'il atteint la nappe par les précipitations (Aller *et al.*, 1987) cela donne l'impression que le système décrit la vulnérabilité à la recharge sans tenir compte des facteurs de dilution et de sorption. Pourtant, Aller *et al.* (1987) expliquent que les processus tels que la sorption, la dispersion, la réactivité, le temps de passage sont pris en compte dans la mise au point des indices et échelles des paramètres (Rosen, 1994). La méthode développée par le département de la santé et du bien-être de l'Idaho (Rupert, 1991) utilise trois paramètres. Ces trois paramètres sont également utilisés par la méthode DRASTIC (Aller *et al.*, 1987). En analysant l'évaluation de ces paramètres, on se rend compte qu'ils ne font pas intervenir les mêmes caractéristiques du milieu (Annexe III). Par contre, si on examine le paramètre recharge de la méthode EVARISK et le paramètre utilisation du sol de la méthode de l'Idaho (Annexe III), on se rend compte qu'il y a des similitudes bien que ces deux paramètres ne soient pas nommés de la même manière.

(4) Remarques relatives à différents paramètres.

Les paramètres les plus souvent utilisés sont le type de sol, les informations de type quaternaires, la profondeur à la nappe ou l'épaisseur de la zone vadose. Certaines variations dans les méthodes viennent de la zone d'étude qui sert de base à l'élaboration des méthodes et selon le but recherché.

La méthode EVARISK est à l'origine basée sur l'estimation de la vulnérabilité à un type de polluant, elle peut être utilisée avec les valeurs de polluant mises à 0. Ce qui correspond à

l'hypothèse faite pour un grand nombre de méthodes signifiant que l'estimation de la vulnérabilité est basée sur l'écoulement et le transport de l'eau. Les paramètres pris en compte sont spécifiques, le tout est de savoir si l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque avec une telle méthode est cohérente avec celle faite par des méthodes développées à des fins d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque.

Remarques générales :

La conductivité hydraulique est un paramètre peu utilisé par les méthodes de vulnérabilité. Il est pourtant affecté d'un indice 3 pour la méthode DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Le flux horizontal est un facteur rarement intégré par les méthodes d'estimation de la vulnérabilité. Il y a des méthodes de vulnérabilité intrinsèque, tel que la méthode de Maxe et Johansson (1998) où des paramètres tels que la vitesse du flux et le temps de passage vertical sont utilisés.

Les facteurs climatiques sont souvent pris en compte par des méthodes qui permettent une estimation de la vulnérabilité spécifique à un type de polluant, telle que EVARISK (Banton *et al.*, 1997) ou la méthode développée par la commission géologique de l'Illinois (Berg et Abert, 1994). Le bilan hydrique est un paramètre utilisé par quelques méthodes telles que EVARISK où il permet de générer les flux d'eau ruisselés, lessivés et drainés (vecteurs des composés à travers le sol). Dans ce cas il remplace le paramètre recharge.

La méthode EVARISK est une des seules méthodes à tenir compte des phénomènes d'adsorption et de désorption et d'hydrolyse.

Le paramètre sol :

Les caractéristiques du sol sont utilisées dans la plupart des méthodes d'estimation de la vulnérabilité, mais sa caractérisation et son utilité varient d'une méthode à l'autre.

Les méthodes DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) et du Minnesota (the geologic sensitivity project workgroup, 1991) se basent sur le type de matériel, mais dans le premier cas des cotes sont affectées en fonction du pourcentage d'argile, de silt et de matière organique alors que pour la méthode du Minnesota l'information permet d'arriver aux matériaux primaires (ce qui revient à avoir une carte des formations superficielles).

La méthode développée par le département des ressources naturelles du Wisconsin (Schmidt, 1987) utilise trois caractéristiques des sols (perméabilité, capacité de rétention et texture) pour définir ce paramètre et ajoute quatre autres paramètres indépendants des sols.

La méthode SCAM3 (Zaporozec, 1985) utilise de l'information relative aux sols déterminée par 7 paramètres, chacun relatif à une caractéristique d'une (ou plusieurs) couche de sol (texture de chaque horizon, pH de l'horizon de surface, profondeur du sol altéré, classe de drainage de sol, contenu en matière organique de l'horizon de surface et perméabilité des horizons du sous-sol).

Pour DRASTIC il s'agit d'un paramètre affecté d'un faible indice (cote de 2), alors que pour la méthode de Maxe et Johansson (1998), l'indice final de vulnérabilité varie en fonction de la présence ou non d'un sol, sans qu'il y ait de paramètre sol à proprement parlé.

Le paramètre profondeur à la nappe :

Les auteurs de DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) considèrent ce paramètre comme l'un des plus significatif pour l'évaluation de la vulnérabilité et lui assignent une cote de 5 soit la cote maximale, alors que les concepteurs de la méthode développée au Wisconsin (Schmidt, 1987) considèrent ce paramètre comme l'un des moins significatif. D'après Schmidt (1987), c'est un paramètre difficilement cartographiable. Si le matériel de la zone vadose est du sable ou du roc fracturé, quel que soit la profondeur à la nappe, il y a de grandes chances que le temps de contact ne soit pas assez important pour qu'il y ait atténuation.

Le paramètre recharge :

Le paramètre recharge est l'un des plus difficile à évaluer. La plupart des méthodes d'estimation de ce paramètre permettent une évaluation indirecte, rarement une évaluation directe. Il est souvent utilisé dans les méthodes d'estimation de la vulnérabilité, mais son importance varie. Il est très important dans la méthode DRASTIC (indice 4) et sous-entendu dans la méthode du Minnesota.

Certains auteurs préfèrent ne pas prendre en compte ce paramètre du fait des incertitudes d'estimation. Ainsi Van Stempvoort *et al.* (1992), considèrent qu'il est plus utile, dans les zones de prairie, de considérer le paramètre conductivité hydraulique pour les cartes générales de protection plutôt que le paramètre recharge.

Navulur et Engel (1997a) estiment le paramètre recharge par utilisation de l'indice de percolation du modèle NLEAP (d'après Deichert *et al.*, 1992; Follet *et al.*, 1991 et Follet *et al.*, 1994 dans Navulur et Engel, 1997a), alors que l'application qui en a été fait dans la MRC de Portneuf, est

basée sur la méthode modifiée du Service de Conservation des Sols (SCS modifiée) (Monfet, 1979).

(5) Cotation et importance d'un paramètre :

Selon le type de méthode considéré, il est possible de donner plus d'importance à certains facteurs. Un nombre important de méthodes des systèmes paramétriques, comme par exemple DRASTIC, SEEPAGE, WISM, affectent un poids selon l'importance donnée aux paramètres, ce qui n'est pas le cas des méthodes analytiques, ni des méthodes cartographiques. Margat (1991), pourtant, définit un certain nombre de variables en leur affectant un facteur d'importance primordial ou secondaire (facteurs de vulnérabilité à des pollutions d'origine superficielles) (Tableau 3). La valeur du poids affecté à chaque paramètre (souvent affecté de manière empirique) varie selon la méthode, mais peut également varier au sein d'une méthode comme par exemple pour la méthode SCAM (Bridson *et al.*, 1994) où le poids sur chaque paramètre est affecté proportionnellement au pourcentage de territoire inférieur à 5 pieds.

Selon la méthode un facteur peut avoir une importance plus ou moins grande, et peut même varier dans l'échelle de vulnérabilité relative. Si on prend le type de matériel géologique, selon les méthodes de cartographie de Margat et Albinet (1968), de GOD, le roc fracturé peut être considéré avec une cote importante dénotant une vulnérabilité plus importante dans ce type de terrain et selon la méthode du Minnesota (qui fait la distinction selon qu'il s'agit d'un terrain peu ou fortement fracturé) il est déterminé comme peu important du fait que ce soit du roc.

Enfin pour un même paramètre donné, la séparation en intervalles ne sera pas la même d'une méthode à l'autre. Si on prend l'exemple du paramètre profondeur à la nappe, Trojan et Perry (1988) ont répertorié 7 méthodes. Ils ont ramené le système de cotation du paramètre à 10 pour chacune de ces méthodes. On peut voir (Tableau 9) que le système de cotation n'est jamais identique. Cela permet de mettre en évidence une variation dans l'importance donnée à ce paramètre par chaque méthode.

Tableau 9 : Transformation sous forme d'échelle du système de cotation du paramètre profondeur à la nappe (tiré de Trojan et Perry, 1988)

DRASTIC											Taux	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pieds	
	100	75	50		30		15	10	5	0		
LeGrand (1964)											Taux	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pieds	
	1000	290	100	80	55	40	30	24	16	9	0	
LeGrand (1983)											Taux	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pieds	
	200		70		30		13		1.8	0		
Fuller											Taux	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pieds	
	19.7				9.8					0		
EPA Hazard Ranking System											Taux	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pieds	
	150		80				18			0		
New Jersey											Taux	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pieds	
	100		55				18			0		
Wisconsin											Taux	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pieds	
	50				20					0		

CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE

La partie description de la zone d'étude de cette section va permettre de mettre en place le contexte d'application des 4 méthodes appliquées. La méthodologie utilisée pour le choix et l'application de ces méthodes sera ensuite expliquée.

2.1 Description de la zone d'étude

La zone d'étude choisie est la MRC de Portneuf. D'une superficie de 4096 km², elle est délimitée par le fleuve Saint-Laurent au sud, la latitude 47°40' au nord, et par les longitudes 71°50' à l'ouest et 72°54' à l'est. L'application des méthodes d'estimation de la vulnérabilité s'effectue sur la partie sud de la MRC de Portneuf, qui est d'une superficie de 900 km². Elle englobe 25 municipalités dont Donnacona, Portneuf, Pont-Rouge et Saint-Raymond (Annexe V).

Le choix de cette zone d'étude a été basé sur : (1) l'intérêt géologique et hydrogéologique de la région qui est représentative des aquifères le long de la rive nord du Saint-Laurent; (2) l'utilisation du sol variée avec la présence de zones agricoles, urbaines et forestières, ce qui rend possible la validation des résultats obtenus avec les différentes méthodes; (3) l'exploitation importante de l'eau souterraine, avec un approvisionnement de 85% de la population avec cette ressource.

2.1.1 Physiographie et hydrographie de la MRC de Portneuf

La MRC occupe deux unités physiographiques délimités par plusieurs failles en échelon séparant les roches précambriennes des roches sédimentaires du paléozoïque (Annexe V): (1) Les Laurentides au nord, caractérisées par un relief accentué. Il s'agit surtout de terrains montagneux, à l'exception de quelques vallées remplies de dépôts sableux et graveleux. Le paysage y est surtout forestier. (2) Les Basses-Terres du Saint-Laurent au sud, caractérisées par un relief relativement plat. Au niveau des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier, on retrouve des sols plus sableux qui sont appréciés pour la culture de pommes de terre. Les sols, à l'intérieur des plaines

argileuses et des régions de till reposant sur des roches sédimentaires, sont constitués de silt et d'argile.

Le découpage hydrographique de la région met en évidence la présence de 5 bassins : le bassin de la rivière Batiscan, le bassin de la rivière Sainte-Anne, le bassin de la rivière Jacques-Cartier, le bassin de la rivière Portneuf et le bassin du fleuve Saint-Laurent (Annexe V).

2.1.2 Contexte quaternaire, description succincte des unités.

La nature et la distribution des formations quaternaires revêtent un caractère important dans notre étude, car la majorité des méthodes utilise la carte des formations superficielles dans l'estimation de la vulnérabilité. Il est donc essentiel de s'y attarder et de donner un bref aperçu du contexte géologique des formations superficielles (Annexe VI).

Le dernier épisode glaciaire a joué un rôle important dans la mise en place des dépôts retrouvés dans la MRC de Portneuf et dans le paysage québécois en général. Ces derniers ont principalement été mis en place lors de la récession de l'Inlandsis Laurentidien et plus particulièrement lors de l'épisode de la Mer de Champlain. La chronologie des événements présentée sur les figures 4 et 5 donnent un aperçu de l'évolution des environnements sédimentaires. Les dépôts quaternaires retrouvés dans la MRC de Portneuf sont diversifiés. Par ordre chronologique pour le dernier épisode glaciaire on retrouve :

- 1) une unité de till (formation de Gentilly) mise en place lors du dernier maximum glaciaire (Wisconsinien supérieur, 18000 BP). Il s'agit d'un diamicton comprenant des faciès de fond et d'ablation, se présentant en couverture continues supérieure à 1 m d'épaisseur (T) ou discontinues et inférieure à 1 m d'épaisseur (Tv). Les formations de tills Tr (couverture continue) et Tvr (couverture discontinue) sont des formations mises en place sous la limite marine. Ces unités ont donc été remaniées par les agents littoraux et se présentent sous la forme d'un diamicton parfois fossilifère contenant des niveaux stratifiés sablo-graveleux, en couche continues ou discontinues.
- 2) Les formations correspondant aux plaines d'épandages subaquatiques (Gs) formées dans la Mer de Champlain (12000 BP) au contact avec le glacier et composées de sable et sable silteux (peu de gravier) de 1 à 20 mètres d'épaisseur.
- 3) Lors de la phase plénimarine, des sédiments fins d'eau profonde (Ma) composés de silts argileux et argiles silteuses se sont mis en place ; l'épaisseur de cette formation varie de moins de 1 mètre à plus de 40 mètres d'épaisseur (Figure 3).

4) À la même époque, formé au front de l'Inlandsis Laurentidien et en contact avec la Mer de Champlain sur une grande partie de son tracé, s'est mise en place, la Moraine de Saint-Narcisse, lors d'une réavancée glaciaire (10800 ± 200 BP) associée à une phase de refroidissement climatique (Girard, 2000). Il s'agit d'un corps sédimentaire composé de différents faciès tels que du till, des diamictons, des blocs, des sables et graviers (Gxt) formant une bande semi-continue qui traverse la MRC du sud-ouest au nord-est. Sa largeur n'excède pas 500 m et son extension en profondeur n'est pas bien connue (Figure 3).

5) Lors de la régression de la mer de Champlain (12000 à 9800 BP), des formations deltaïques (Md) et littorales (Mb) se sont mises en place à l'embouchure des cours d'eau se déversant dans la Mer de Champlain. Les sédiments deltaïques (Md) sont composés de sables, de sables graveleux et de graviers stratifiés et bien triés de 1 à 40 m d'épaisseur, et constituent la principale formation aquifère de la région. Les sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation (Mb) sont composés de sable, silts sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés, d'épaisseur variant de 0,5 à 5 m. On retrouve également comme formations équivalentes les formations Ld et Lb qui sont des sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation de même type que les deux précédentes, mais mises en place lorsque le niveau de l'eau se situait à environ 60 m d'altitude et formait le lac Lampsilis (Figure 4).

6) Se déposent également à la même époque (époque des dépôts de Mb et Md) les sédiments d'épandage proglaciaires subaériens (Go) en interdigitation avec les sédiments deltaïques Md. Les formations Go sont composées de sable, graviers et blocs montrant une décroissance granulométrique vers l'aval. Leur épaisseur varie de 1 à 20 m (Figure 4).

7) Les formations des terrasses fluviales se sont alors mises en place (At). Elles sont composées de sable, silt sableux, sable graveleux et gravier contenant de la matière organique. Ces alluvions forment une mince couche de 1 à 2 m d'épaisseur pouvant aller jusqu'à 5 m. Ces alluvions sont plus importantes en étendue que les alluvions actuelles (Ap) composées de sable, silt sableux, sable graveleux et gravier contenant de la matière organique, mises en place dans les vallées encaissées. Elles forment les barres et levées des plaines de débordement actuelles et de minces couches de sables silteux couvrant le roc (Figure 4).

Les formations géologiques à potentiel aquifère de la MRC sont : (1) le delta de la rivière Sainte-Anne qui draine la moitié de la région d'étude, le delta de la rivière Jacques-Cartier qui draine la partie sud-est de la région d'étude et la vallée de la rivière Charest; (2) les abords de la moraine de Saint-Narcisse; (3) les sables confinés sous le bassin argileux de Saint-Thuribe susceptibles de contenir un aquifère captif (Fagnan, 1998).

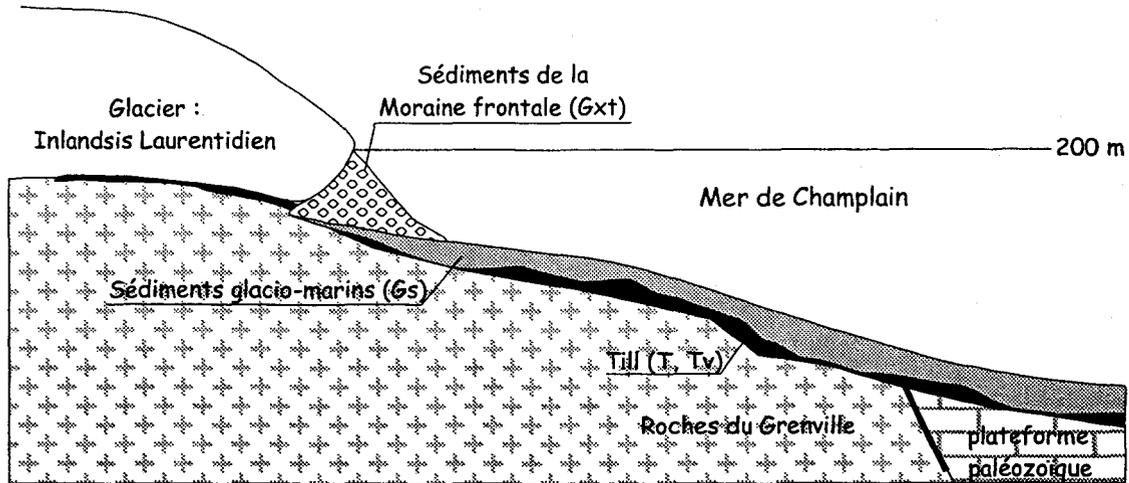


Figure 3 : Mise en place des dépôts de till et des sédiments glacio-marins et construction de la Moraine de Saint-Narcisse (12000 à 10400 BP) (Parent (1997, données inédites)).

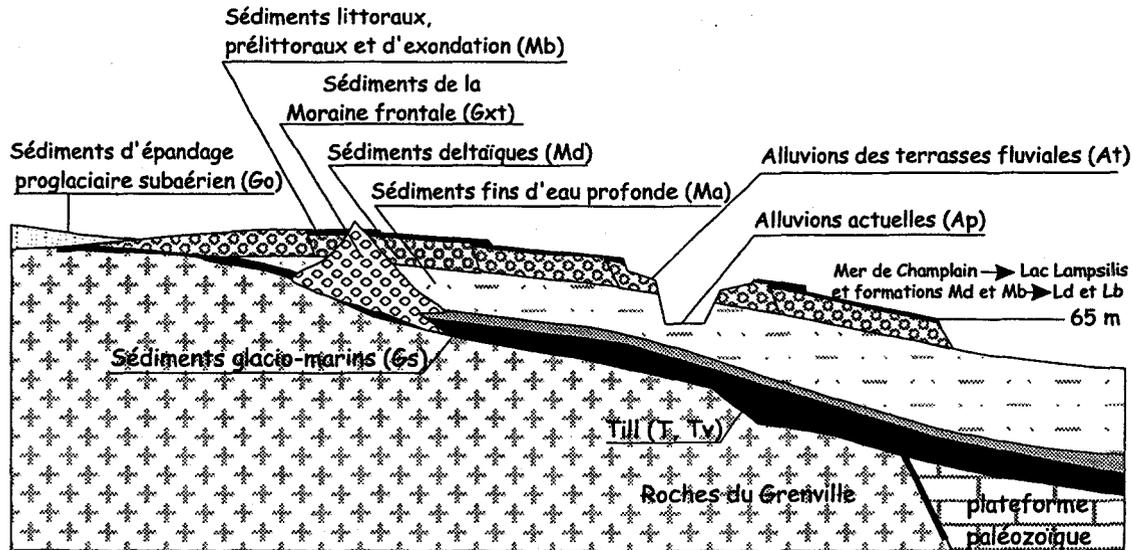


Figure 4 : Architecture des dépôts quaternaires de manière simplifiée (Parent (1997, données inédites)).

Les unités quaternaires présentes dans la MRC de Portneuf, se résument dans le Tableau 10 :

Tableau 10 : Formations quaternaires retrouvées dans la MRC de Portneuf.

Nom	Matériau	Description
R	Roches métamorphiques et magmatiques précambriennes	gneiss charnockitique
R+	Roches sédimentaires paléozoïques	clacaires et shales
Q	Formations quaternaires non différenciées	sables de Vieilles-Forges, rythmites du Saint-Maurices, etc...
Tv	Till en couverture discontinue	diamicton comprenant essentiellement des faciès d'ablation de moins de 1m
T	Till en couverture généralement continue	diamicton comprenant des faciès de fond et d'ablation
Tvr	Till remanié en couverture discontinue	diamicton parfois fossilifère et comprenant des des niveaux stratifiés sablo-graveleux
Tr	Till remanié	diamicton parfois fossilifère et comprenant des des niveaux stratifiés sablo-graveleux
Grf	Sédiments de la moraine frontale de Saint-Narcisse	till, diamicton, blocs, sable et gravier
Gr	Sédiments juxtaglaciaires	sable et gravier, blocs, un peu de till ou de diamicton
Gs	Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique	sable et sable silteux, un peu de gravier
Go	Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien	sable, gravier et blocs, montrant une décroissance granulométrique générale vers l'aval
Ma	Sédiments fins d'eau profonde	silt argileux et argile silteuse (40m d'épaisseur)
Ab	Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation	sable, silt sableux, sable graveleux et graviers stratifiés et triés (phase plénimarine)
Ab	Sédiments deltaïques	sable, sable graveleux et gravier, stratifiés et bien triés (embouchure des cours d'eau se déversant dans la mer de Champlain)
Lb	Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation	sable, silt sableux, sable graveleux et graviers stratifiés et triés (phase plénilacustre)
Lb	Sédiments deltaïques	sable, sable graveleux et gravier, stratifiés et bien triés (embouchure des cours d'eau se déversant dans le lac Lampsilis)
At	Alluvions des terrasses fluviales	sable, silt sableux, sable graveleux et gravier contenant un peu de matière organique
Ap	Alluvions actuelles	sable, silt sableux, sable graveleux et gravier contenant fréquemment de la matière organique
O	Dépôts organiques	tourbe, débris végétaux et humus
Mg	Sédiments remaniés par des glissements de terrain	sédiments silto-argileux remaniés

2.1.3 Qualité de l'eau souterraine

La qualité naturelle de l'eau souterraine diffère de celle des eaux de surface car, pour toute source donnée, sa qualité, sa température et ses paramètres sont moins variables dans le temps. Par ailleurs, l'échelle des valeurs des paramètres de l'eau souterraine est beaucoup plus grande que pour les eaux de surface et enfin l'eau souterraine tend à être plus minéralisées que les eaux de surface. L'eau souterraine est en général exempte de micro-organismes pathogènes et elle contient habituellement moins de matières en suspension et de matières non dissoutes que les eaux de surface (Environnement Canada, 1997).

Il y a quatre voies d'accès des contaminants aux eaux souterraines; l'infiltration, la migration, l'échange entre aquifère, et la recharge des eaux de surface (d'après Barcelona *et al.*, 1988 dans Lynch, 1994).

Les objectifs à atteindre pour obtenir une eau de qualité sont que l'eau potable doit être saine et avoir un goût et un aspect agréable. Elle doit aussi être exempte d'organismes pathogènes, de substances chimiques ou radioactives dangereuses et ne pas présenter de couleur, d'odeur ou de goût déplaisant (d'après Ward, 1978 dans Fréchette, 1987). La connaissance sur les concentrations en contaminant dans les eaux souterraines et sur l'utilisation du sol sont des informations utiles pour l'estimation de la vulnérabilité. En effet, sachant que les zones contaminées se retrouvent le plus souvent en région agricole et en assumant une application uniforme (bien que non réaliste) du contaminant, les concentrations dans les eaux souterraines reflètent la vulnérabilité des eaux souterraines (Schleyer, 1994).

Une étude réalisée en 1991 dans la MRC de Portneuf sur les eaux souterraines, concernant les analyses bactériologiques et chimiques en nitrates et en pesticides a montré une présence généralisée de nitrates dans les puits étudiés. La présence de pesticides était également détectée (Paradis *et al.*, 1991). Dans deux municipalités de la MRC de Portneuf, la présence de pesticides et nitrates a nécessité l'abandon des prises d'eau (Fagnan, 1998), ce qui montre l'ampleur des problèmes de contamination. La présence de ces problèmes de contamination confirme le besoin d'effectuer des études de vulnérabilité.

2.2 Éléments de réalisation des cartes de vulnérabilité

La vulnérabilité à la pollution peut faire l'objet d'une cartographie de classification. Ce qui constitue la méthode d'expression et de diffusion des informations la plus commode vis-à-vis de diverses catégories d'utilisateurs (Albinet et Margat, 1970). La cartographie de la vulnérabilité est définie par comme une technique de quantification de l'estimation de la vulnérabilité et comme technique de visualisation d'une manière utile et pratique dans les processus de prise de décision (tiré de Bachmat et Collin, 1987 dans Vrba et Zaporozec, 1994). La carte de vulnérabilité est une carte exprimant le degré de risque de contamination de l'eau souterraine dans les aquifères supérieurs, par les contaminants arrivant à la surface (tiré de Goossens et Van Damme, 1987 dans Vrba et Zaporozec, 1994).

En fait, ce sont des cartes qui peuvent autant servir d'outil de dépistage d'éventuelles contaminations que d'aide à la prévention.

2.2.1 Contenu des cartes de vulnérabilité

Une carte de vulnérabilité est un outil spécifique à l'utilisation pour laquelle elle a été conçue. D'après Vrba et Zaporozec (1994) afin d'être utilisée à bon escient, il serait bon qu'elle contienne: (1) la légende des indices de vulnérabilité et des symboles utilisés; (2) une légende explicative décrivant les utilisations pour lesquelles elle a été construite; (3) un compte rendu de la méthode d'évaluation employée et (4) une référence aux types et à la quantité de données exploitées, ainsi qu'un résumé des principaux contextes hydrogéologiques rencontrés et des facteurs utilisés pour l'estimation de la vulnérabilité (Figure 5).

Pour ce mémoire, la carte de vulnérabilité et la légende des indices (item (1)) sont à l'annexe VII et les items (2) à (4) sont inclus aux chapitres 2 et 3.

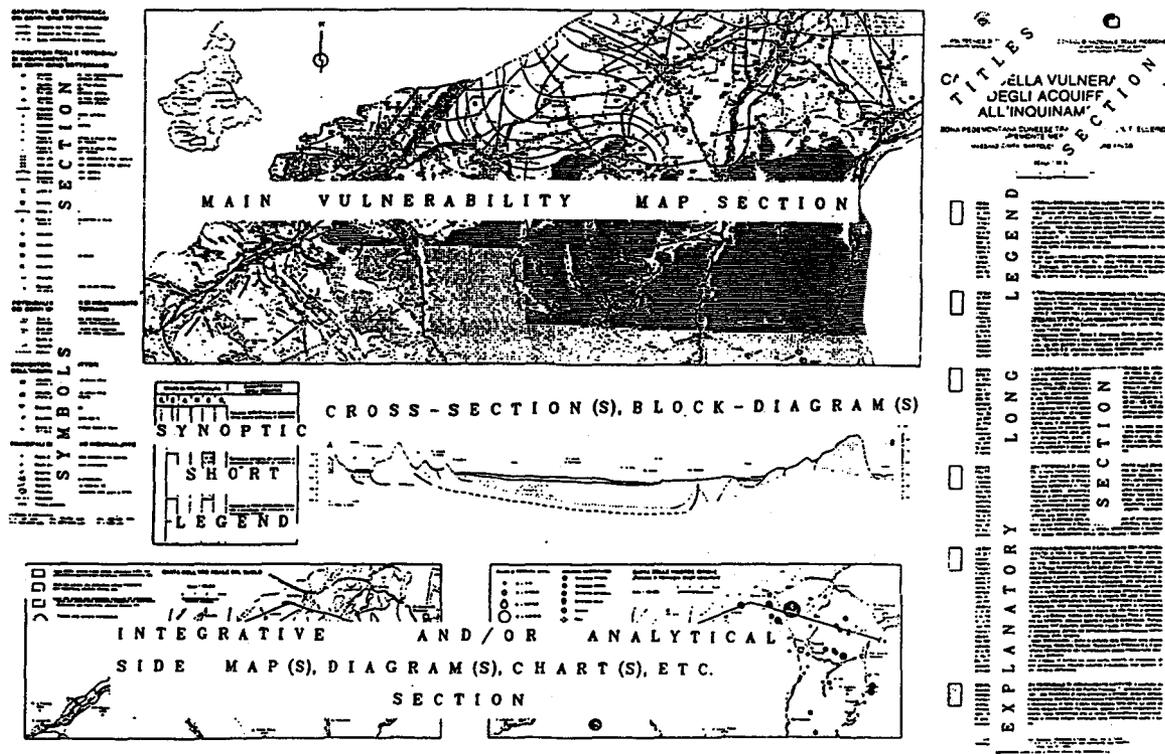


Figure 5 : Exemple d'un format de carte de vulnérabilité (tiré de Vrba et Zaporozec, 1994)

2.2.2 Échelle de réalisation des cartes

Chaque auteur de méthode, indépendamment de la catégorie, a son propre point de vue quant à l'échelle à laquelle une carte de vulnérabilité régionale doit être réalisée. Par exemple DRASTIC suggère un territoire d'au minimum de 0.4 km², la méthode du Minnesota préconise la réalisation de carte au 1/100 000, Albinet et Margat (1970) réalisent la cartographie de la vulnérabilité régionale de la France à l'échelle du 1/1 000 000. On retrouve tout cela dans le système de classification de Struckmeier (1989) (Tableau 6), qui classe les cartes de vulnérabilité comme cartes de gestion et protection statiques, peu fiables, de petite échelle.

On peut répertorier les niveaux de réalisation de carte en quatre classes selon le système établi par Vrba et Zaporozec (1994) : (1) Les cartes générales d'échelle 1/500 000 et plus qui sont des cartes synthétiques dont les détails sont perdus. Ce sont des atlas servant pour la gestion du territoire à l'échelle de protection nationale ou internationale. (2) Les cartes schématiques d'échelle 1/100 000 à 1/500 000 qui sont des cartes d'estimation des problèmes de contamination diffuses dont les détails sont perdus. Ce sont des cartes servant à la gestion et à l'aménagement du territoire à l'échelle de protection régionale. (3) Les cartes opérationnelles d'échelle 1/25 000 à 1/100 000 qui sont des cartes d'aide à la détermination de programmes de protection des eaux souterraines. Ce sont des cartes analytiques destinées à l'évaluation de la vulnérabilité spécifique au parcours d'un contaminant. (4) Les cartes spécifiques d'échelle 1/25 000 ou moins qui sont des cartes d'aide à la mise en place de programmes de protection des eaux souterraines, des puits. Ce sont des cartes de vulnérabilité spécifiques à un site.

Le choix du type de méthode change selon la situation et la démarche visée. Dans le cadre d'une étude restreinte au Québec, les cartes générales ne seraient d'aucune utilité (car la quantité d'information perdue serait trop importante) et la réalisation de cartes spécifiques à un site donné serait trop poussée. On s'intéresse donc plus aux cartes de types schématiques et opérationnelles dans lesquelles rentrent les méthodes de vulnérabilité intrinsèques et spécifiques.

L'échelle des cartes de vulnérabilité doit être sélectionnée en fonction des caractères et de la complexité des conditions hydrogéologiques ainsi que de la précision voulue pour le travail. Ainsi d'après Albinet et Margat, (1970), la carte au 1/1 000 000 (ensemble de la France) présente une vue générale des paramètres conditionnant la vulnérabilité des nappes, la carte au 1/250 000 donne une vue plus détaillée de ces paramètres, et enfin la carte au 1/50 000 devrait constituer un

préalable aux études quantitatives détaillées qui nécessitent l'aménagement de zones industrielles ou urbaines et la délimitation des périmètres de protection.

D'après les auteurs de « *a review of methods for assessing aquifer sensitivity and groundwater vulnerability to pesticide contamination* » (EPA, 1993) la représentation cartographique de la vulnérabilité des aquifères se fait à petite échelle (1/100 000). Car à la différence des modèles à grande échelle (qui sont souvent des modèles de transport de contaminants) qui nécessitent des informations détaillées, l'estimation à l'échelle régionale peut se faire avec une quantité réduite d'information.

2.2.3 L'utilisation des SIG pour les cartes de vulnérabilité

Les SIG ou Systèmes d'Information Géographique représentent une technologie à travers laquelle les informations géographiques référencées spatialement peuvent être saisies, emmagasinées, retrouvées, analysées et illustrées (d'après Burrough, 1986 dans Tim *et al.*, 1996). Le développement des SIG, depuis leur apparition dans les années 1960, a permis de faire évoluer ce concept de cartographie en rendant possible la réalisation de cartes contenant plusieurs niveaux d'information et une quantité de données importante. Une protection efficace doit passer par la prévention, et nécessite des informations continues afin de déterminer les problèmes de qualités actuels et ceux à venir (Vrba et Zaporozec, 1994). L'utilisation des SIG a pour but de structurer l'information et rendre la lecture des données instantanée, conviviale et claire, et permet une mise à jour des informations au fur et à mesure qu'elles sont disponibles.

Les logiciels utilisables pour la réalisation de cartes de vulnérabilité sont nombreux et variés. Il y a les logiciels à systèmes matriciels, à systèmes vectoriels et les logiciels permettant l'utilisation de systèmes matriciels et de systèmes vectoriels (Figure 6). Un système matriciel lit et traite les informations sous forme de pixels, à un pixel est attribué une valeur, la taille du pixel peut varier. Un système vectoriel lit et traite les informations sous formes d'entités telles que des polygones et des polygones. L'avantage des systèmes matriciels réside dans la souplesse du traitement des informations, tandis que celle des systèmes vectoriels réside dans la facilité de visualisation et d'ajout de données ponctuelles. Parmi les plus utilisés, on peut citer : (1) Mapinfo qui est un système vectoriel; (2) IDRISI qui permet une utilisation simple et rapide des systèmes matriciels et la transformation des informations en système vectoriel. IDRISI permet également d'utiliser tant les fonctions standards du logiciel que le code développé spécifiquement; (3) ARC INFO qui

travaille en système matriciel; et (4) ARC VIEW qui permet une utilisation très souple des données en vectoriel ou matriciel.

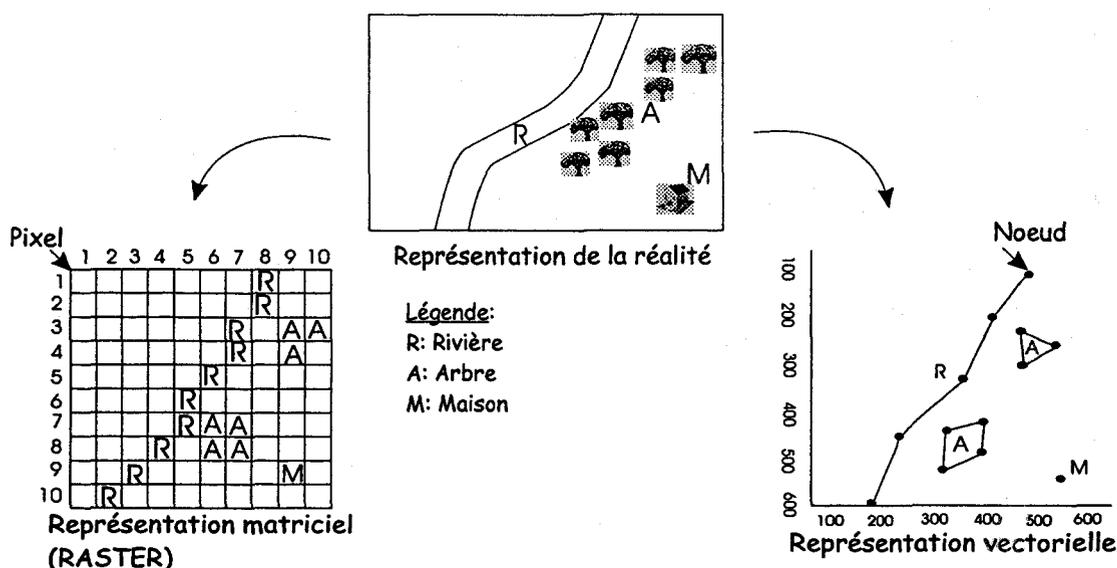


Figure 6 : Systèmes matriciel et vectoriel (tiré de Cooper *et al.*, 1997)

2.2.4 Acquisition de données

La phase d'acquisition des données relative à l'établissement de la carte de vulnérabilité intrinsèque inclut la cueillette, la synthèse et le traitement des informations disponibles concernant l'hydrogéologie régionale, la géologie régionale des formations superficielles et lorsque requis par la méthode sélectionnée, les informations relatives aux sols et à l'utilisation du sol. La quantité de données nécessaires dépend de la méthode sélectionnée, des différents facteurs concernés et de l'échelle de l'estimation. Il est préférable, dans la mesure du possible, que pour chaque facteur hydrogéologique la quantité d'informations disponible soit suffisante pour être représentative du milieu. Les informations généralement disponibles sont : (1) la carte géologique de la région, la carte des formations superficielles, la carte topographique (pouvant être issue d'un Modèle Numérique de Terrain); (2) compilation des forages et levés géophysiques, carte piézométrique, carte des unités hydrogéologique, analyse granulométrique, essais de pompage. Les paramètres hydrogéologiques sont à déduire (transmissivité, conductivité hydraulique, porosité etc...); (3) carte pédologique, carte d'utilisation des sols.

Il est important de préciser que même dans le cas où ces informations sont disponibles avant la réalisation d'une carte, il est bon que le concepteur effectue une reconnaissance sur le terrain.

Lorsqu'ils existent ces renseignements sont disponibles à divers endroits (Tableau 11) :

Tableau 11: provenance des données nécessaire à l'établissement des cartes de vulnérabilité (tiré de Michaud et Lefebvre, (éd.) 2000).

Ministères					Instances Municipales (M)		Organismes Privés (C)	SOURCES	TYPES DE DONNÉES
Fédéraux (F)		Provinciaux (P)			Municipalités Régionales de Comté (MRC)	Municipalités	Firmes privées de consultants		
Ressources naturelles Canada	Transports	Environnement et Faune	Ressources naturelles	Agriculture, pêcheries et alimentation					
2,7			2,7,8,10					Socle rocheux	Géologie
1,3,7			1,3,26	4				Dépôts quaternaires	
1,2,7	9	13,14,16	1,2,3,26					Stratigraphie	
	9	13,14,15,16	3					Niveau de l'eau souterraine	Propriétés Aquifères
	9	14,15,16						Granulométrie	
		14,15,16						Propriétés hydrauliques [▲]	
	9							Propriétés mécaniques ^{▲▲}	Hydrogéologie
3				4,5				Pédologie	
6		18,19	11,6					Hydrologie	Infiltration et Écoulement
		17						Météorologie	
5,6,7			11,12					Topographie	Qualité
		20,21						Systèmes d'approvisionnement en eau souterrain	
		20						Qualité de l'eau souterraine	
3		6,22,23,24	27		1			Utilisation du sol et de l'eau	Utilisation et Vulnérabilité

▲ : transmissivité, conductivité hydraulique et coefficient d'emmagasinement. ▲▲ : teneur en eau, limite plastique liquide, pénétromètre, scissomètre, sismique et cisaillement. 4 : Source pour le type de données

FÉDÉRAL

- F1 - Cartes et rapports sur les formations superficielles
- F2 - Cartes et rapports sur le socle rocheux
- F3 - Cartes des inventaires des Terres du Canada
- F4 - Cartes topographiques format papier et numérique (1:50000, 1:250000)
- F5 - Données numériques d'élévation du Canada (1:250000)
- F6 - HYDAT : Archives nationales des données hydrologiques
- F7 - Catalogue collectif et GEOSCAN (Bd bibliographiques)

PROVINCIAL

- P1 - Cartes et rapports sur les formations superficielles
- P2 - Cartes et rapports sur le socle rocheux
- P3 - Cartes et rapports sur les ressources en granulats
- P4 - Cartes et rapports pédologiques
- P5 - Bd sur les sols québécois (BIRSQ)
- P6 - Photographies aériennes (1:15 000 et 1:40 000)
- P7 - Index des puits d'exploration du gaz et du pétrole
- P8 - Carothèque
- P9 - Données géotechniques du MTQ
- P10 - Levés géophysiques
- P11 - Bd topographiques (BDTQ) (1:20 000)

- P12 - Bd géodésiques du Québec (GÉODEQ II)
- P13 - Système d'information hydrogéologiques (SIH)
- P14 - Bd piézométriques
- P15 - Cartes et rapports hydrogéologiques produits par les ministères provinciaux
- P16 - Rapports d'études hydrogéologiques de consultants disponibles au ministère de l'Environnement
- P17 - Données climatologiques
- P18 - Cartes et informations sur les bassins versants
- P19 - Bd hydriques
- P20 - Bd sur l'eau potable
- P21 - Bd sur la qualité du milieu aquatique
- P22 - Production piscicole
- P23 - Bd sur les terrains contaminés GTC
- P24 - Lieux d'enfouissements divers
- P25 - Envirodoq et Collection générale (Bd bibliographiques)
- P26 - EXAMINE et SIGEOM (Bd bibliographiques)
- P27 - Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA), 1:20 000
- P28 - Cartes d'utilisation du sol et données sur les pratiques

MUNICIPAL

- M1 - Schéma d'aménagement

2.2.5 Utilisation et limitations des cartes de vulnérabilité

Les cartes de vulnérabilité ont pour but de montrer les grandes tendances de la vulnérabilité pour l'affectation d'activités à risque sur des territoires régionaux. Ce sont des cartes d'aide à la gestion et à l'aménagement du territoire, elles doivent être suivies d'études plus poussées et spécifiques. Les méthodes se sont généralisées du fait du manque d'informations précises. Ce qui engendre que les cartes doivent être interprétées avec beaucoup de précaution car d'après des auteurs tels qu'Andersen (dans Foster et Hirata, 1991) le concept de «vulnérabilité générale à un polluant universel pour un scénario de pollution typique » ne veut rien dire (Foster et Hirata, 1991).

Il est parfois difficile de comparer des cartes de vulnérabilité. D'une part parce que les méthodes d'évaluation ne sont pas forcément compatibles et d'autre part parce que l'application d'une méthode est subjective et donc qu'une méthode appliquée par deux personnes différentes ne donnera pas forcément les mêmes résultats.

L'estimation de la vulnérabilité sur un territoire donné est une évaluation relative. Les valeurs d'indice calculées ne sont pas quantitatives, mais qualitatives et relatives à la région traitée. La valeur de vulnérabilité affectée à une zone permet de la classer comme zone plus ou moins vulnérable par rapport aux autres zones de la carte. Par contre, elle ne permet pas d'affirmer que cette zone est ou n'est pas vulnérable dans l'absolu. Il n'est pas recommandé de réaliser des cartes des zones sensibles par rapport aux zones non-sensibles, toutes les zones sont sensibles, elles le sont plus ou moins.

L'échelle choisie pour la réalisation des cartes de vulnérabilité intrinsèque dépend de la quantité de données disponible et du territoire couvert. Elle est définie en début d'étude et l'utilisation des cartes se limite à l'échelle pour laquelle elles ont été conçues, bien qu'il soit possible de les utiliser à une échelle plus grande. En effet les complexités hydrogéologiques ne peuvent être représentées sur des cartes compilées à petite échelle. Pour des études locales, il convient d'établir une nouvelle carte d'échelle agrandie et d'effectuer l'étude de vulnérabilité avec une densité de données plus importante.

2.2.6 Conclusion

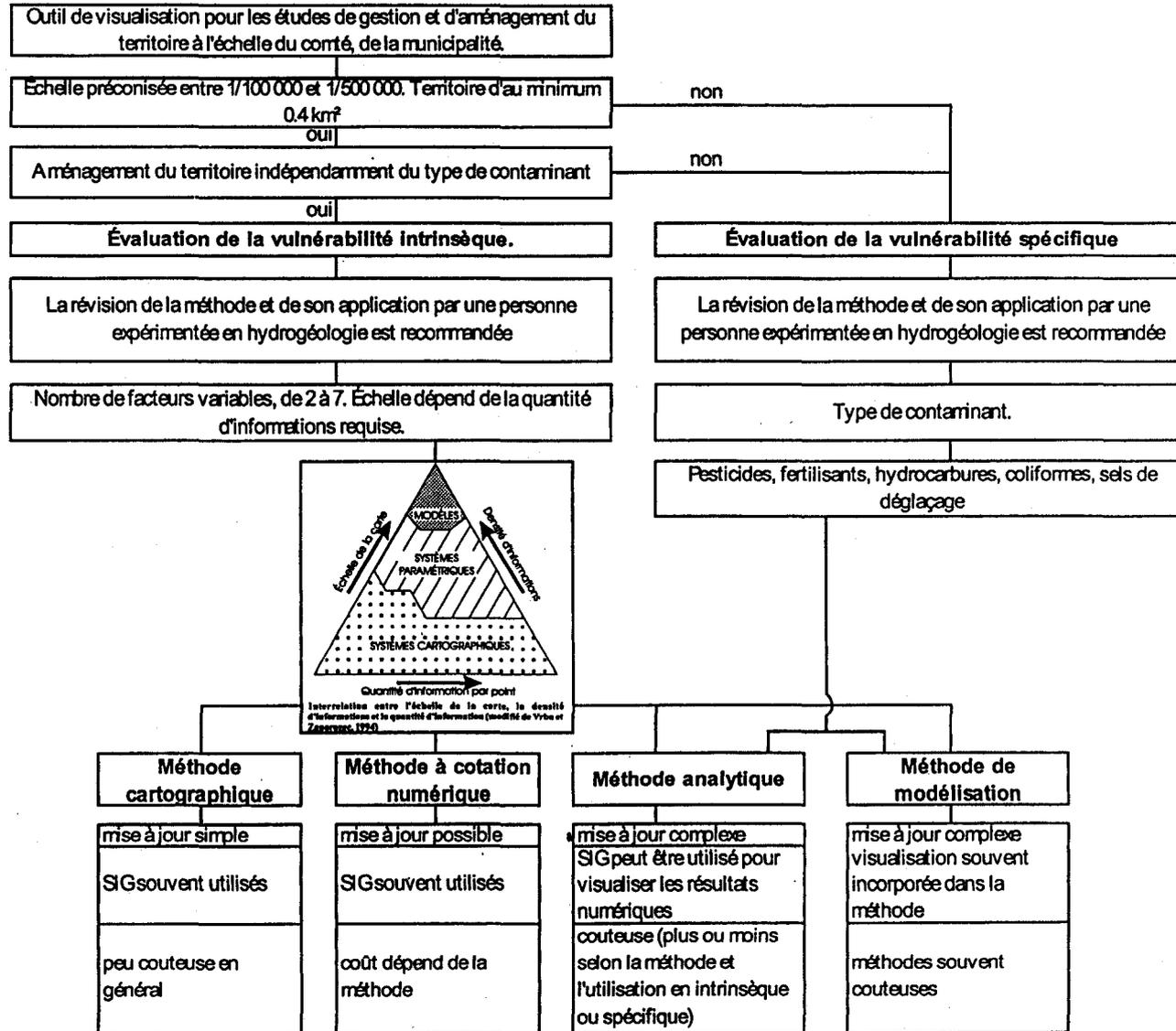
Dans notre cas, il s'agit de déterminer les zones aquifères de la MRC qui présentent le plus de risques à la contamination. La cartographie régionale est l'outil adapté pour ce type de travail et s'effectue à l'échelle de la carte schématique, soit au 1/ 100 000. Les cartes de vulnérabilité intrinsèque que l'on peut également nommer cartes de vulnérabilité indifférenciées régionales puisque d'un usage non spécifique, se réfèrent à un polluant moyen. Elles donnent des indications préliminaires aux gestionnaires et aménagistes afin d'orienter les décisions, mais ne permettent qu'une sensibilisation de première approche. Ainsi, l'implantation d'une décharge publique ou toute autre activité humaine potentiellement polluante, nécessite une étude locale plus poussée. C'est à ce niveau que les cartes de vulnérabilité spécifique sont utiles, en considérant l'impact d'une activité sur la ressource.

Il faut garder à l'esprit que tous les aquifères sont vulnérables aux contaminants persistants et non-dégradables, et que la seule capacité de dilution du système eau souterraine ne permettra pas, en général, une diminution significative de la pollution.

2.3 Choix des méthodes

Le choix d'utilisation d'une méthode de vulnérabilité plutôt qu'une autre dépend de l'objectif à atteindre (Figure 7). Dans un premier temps il est bon de déterminer le type de méthode qu'il vaut mieux employer, puis par la suite déterminer la méthode en fonction des données disponibles, des données nécessaires, des informations disponibles sur l'application de la méthode et des particularités d'application de la méthode (Annexe II).

Figure 7 : Organigramme pour l'aboutissement à une méthode d'évaluation de la vulnérabilité.



2.3.1 Choix du type de méthode.

Le choix du type de méthode peut se faire en fonction de l'étude à effectuer. En effet, d'après Vrba et Zaporozec (1994), d'un point de vue qualitatif, il est possible d'indiquer la corrélation entre trois facteurs (la densité de points, la quantité d'information sécuritaire pour les points, le dénominateur d'échelle) par rapport au type de méthode.

On peut déduire du diagramme triangulaire de la Figure 7 (modifiée de Vrba et Zaporozec, 1994) que les modèles analytiques complexes s'utilisent à grande échelle pouvant aller du 1/25 000 au 1/100 000. Ils nécessitent une densité d'information importante ce qui n'est pas toujours compatible avec une échelle telle que le 1/100 000 préconisé pour les études de vulnérabilité régionales. Pour une densité de points moyenne, une méthode à cotation numérique sera préférentiellement utilisée. Dans les cas où la quantité d'information est moindre, l'échelle utilisée sera plus petite, jusqu'au 1/500 000 et la méthode préconisée sera de type cartographique, les coûts engendrés seront alors moins importants.

2.3.2 Choix de la méthode

Le choix des méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution s'est avéré difficile étant donné leur nombre. Cependant, il a été guidé par divers éléments :

- (1) le but de l'évaluation de la vulnérabilité (étude régionale ou étude de caractérisation plus pointue);
- (2) les conditions d'utilisation de la méthode. Il faut que la méthode soit utilisée dans les conditions hydrogéologiques et selon les modalités pour lesquelles elle a été conçue (Aller *et al.* 1987). Ainsi choisir une méthode d'évaluation de la vulnérabilité implique une connaissance approfondie du milieu de manière à évaluer l'applicabilité des méthodes. C'est pourquoi il est important d'avertir les utilisateurs des limitations de validité des cartes.
- (3) la quantité d'information disponible et le nombre de paramètres utilisés, afin d'avoir un rapport coût/fiabilité d'estimation le meilleur possible. D'après Vrba et Zaporozec (1994), le choix d'une méthode lors de l'évaluation de la vulnérabilité doit prendre en compte la disponibilité des informations de base.
- (4) les facteurs limitatifs divers, d'ordre monétaires, effectifs humains ou matériels (accessibilité à des supports informatiques).

Pour l'étude présente étant donné la flexibilité au niveau de la quantité d'informations disponible, de la densité de l'information, on a choisi d'appliquer une méthode de chaque type en plus de DRASTIC. Cela permet de mettre en évidence la variation d'évaluation en fonction du type de méthode. Quatre méthodes vont être appliquées dans le cadre de cette étude. Les deux premières méthodes sélectionnées entrent dans la catégorie des méthodes par cotation numérique, mais le nombre de paramètres utilisé n'est pas le même, ce qui s'avérera important par la suite, lors de la détermination de la corrélation entre paramètres. La méthode EVARISK est une méthode analytique et la méthode du Minnesota est une méthode cartographique.

2.4 Description des méthodes retenues et application

Lors de cette étude, quatre méthodes ont été appliquées, chacune ayant nécessité un certain nombre d'information, de traitement de l'information, de logiciel de traitement et de visualisation. La présente section permet de décrire les démarches établies lors de la réalisation de chacune des méthodes, les informations et les logiciels utilisés.

2.4.1 La méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC et donc la carte de vulnérabilité DRASTIC, a été choisie comme référence pour la présente étude. La méthode DRASTIC est une méthode de détermination de la vulnérabilité d'une eau souterraine à être polluée, elle peut être utilisée pour l'estimation de la vulnérabilité aux pesticides, mais les indices utilisés sont différents (Aller *et al.*, 1987).

2.4.1.1 Théorie

Cette méthode a été conçue dans les années 1980 par la National Water-Well Association suite à une demande de l'EPA. L'objectif était de réaliser une méthode d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque applicable aux conditions hydrogéologiques rencontrées aux États-Unis. La méthode DRASTIC prend en compte sept paramètres, chaque première lettre d'un paramètre constituant le nom de cette méthode. Chacun des sept paramètres est affecté d'un facteur multiplicatif (D_p) qui va croissant de 1 à 5 selon l'importance du paramètre pour l'estimation de la vulnérabilité. Ce poids est fixe pour chaque paramètre, mais change selon que l'on utilise DRASTIC ou pesticide DRASTIC (Figure 8).

- (D) Le paramètre profondeur (Depth) à la nappe est coté comme un des deux plus important paramètres dans DRASTIC, avec un poids de 5 et des valeurs de référence de 0 et 100 pieds.
- (R) Le paramètre Recharge présente un poids de 4 dans DRASTIC, et des valeurs de référence de 0 et 10 pouces.
- (A) Le type d'Aquifère présente un poids de 3.
- (S) Le type de Sol présente un poids de 2. Dans le manuel DRASTIC, un inventaire des différents types de sol (selon la classification de Chart, Soil Conservation Service, 1951) avec les caractéristiques au niveau de l'augmentation du potentiel de contamination pour chacun, a été réalisé.
- (T) La topographie est un des paramètres le moins important de DRASTIC avec un poids de 1, l'indice est spécifier en fonction du pourcentage de pente (les valeurs de référence sont 0 et 18%).
- (I) L'Impact de la zone vadose est l'autre paramètre le plus important pour le modèle DRASTIC, en effet un poids de 5 lui est attribué.
- (C) La Conductivité hydraulique a un poids de 3, les valeurs de référence sont de 1 et 2000 gallons par jour /pied.

Il en résulte un **Indice** de vulnérabilité calculé selon l'équation 2.1 :

$$\text{Équation 2.1 : } I = D_R D_w + R_R R_w + A_R A_w + S_R S_w + T_R T_w + I_R I_w + C_R C_w$$

Avec : R : cote

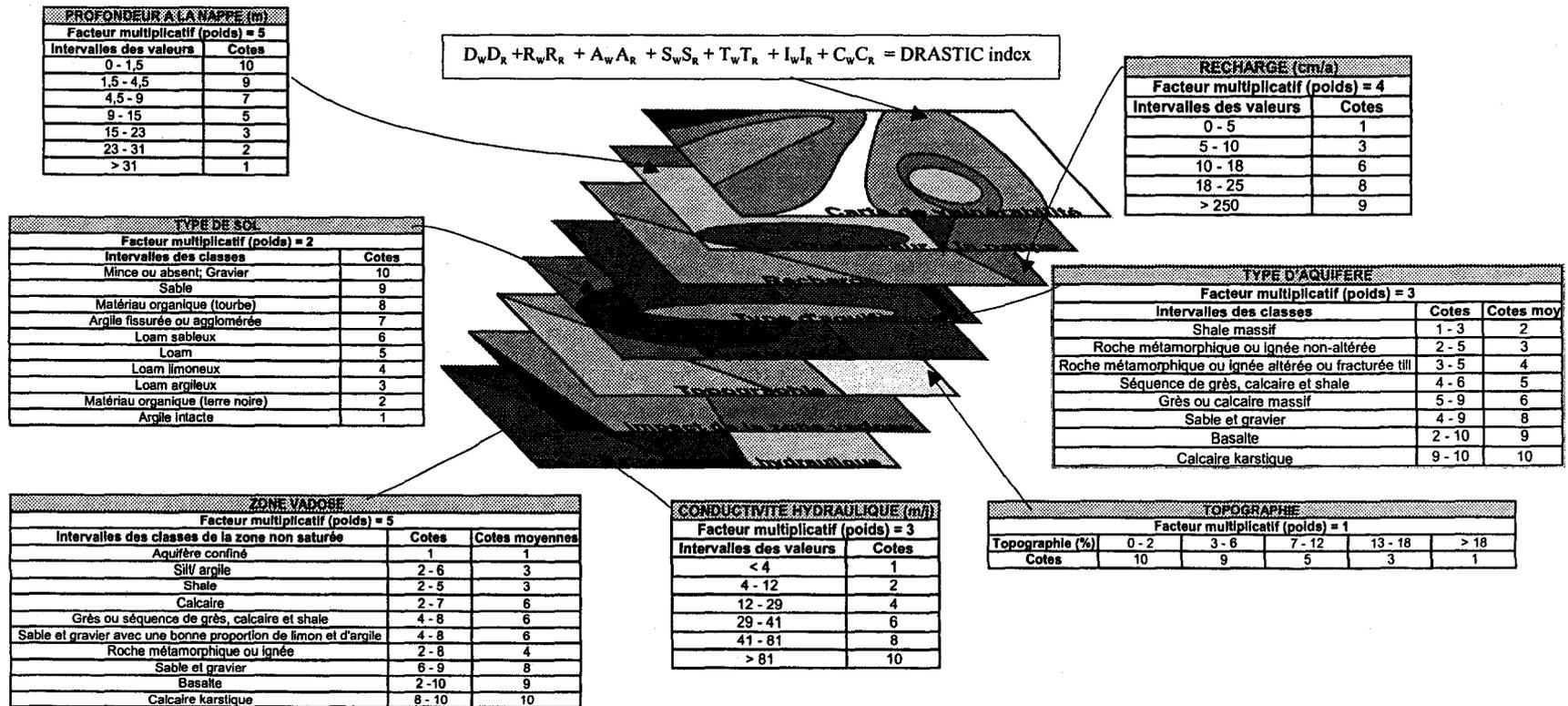
w : poids

La vulnérabilité augmente avec l'indice. A chaque paramètre est attribué une échelle comprenant des intervalles où une cote est attribuée selon la particularité du milieu. Par exemple plus la profondeur à la nappe est grande plus la cote est faible. Il est possible d'utiliser cette méthode pour les aquifères confinés et les aquifères à surface libre, mais, il faut le faire séparément. La gamme possible de valeurs de vulnérabilité se retrouve entre 23 et 226 pour DRASTIC et 26 et 256 pour Pesticide DRASTIC. Les valeurs sont alors regroupées en 8 classes (Tableau 12) :

Tableau 12 : Classification des indices DRASTIC (Aller et al., 1987)

Intervalles	Indice DRASTIC
23 - 79	8
80 - 99	7
100 - 119	6
120 - 139	5
140 - 159	4
160 - 179	3
180 - 199	2
200 - 226	1

Figure 8 : La méthode DRASTIC, paramètres et cotation



2.4.1.2 Limitations

Les conditions d'utilisation de la méthode DRASTIC sont au nombre de 4 : (1) le contaminant est introduit à la surface du sol; (2) le contaminant arrive aux eaux souterraines par précipitations; (3) le contaminant a la mobilité de l'eau; (4) la zone à évaluer est d'au moins 0.4 km².

Le choix de l'échelle se fait au départ, la carte ne peut être utilisée à une autre échelle que celle à laquelle elle a été conçue.

Pour les concepteurs de la méthode, les aquifères confinés et libres ne peuvent être évalués sur un même niveau. La carte de vulnérabilité réalisée dans le cadre de cette étude est celle représentant les nappes libres ou semi-confinées. La visualisation des aquifères confinés (même s'il s'agit du premier aquifère rencontré) se ferait en élaborant une nouvelle carte.

2.4.1.3 Origine de l'étude et controverse au sujet de la méthode DRASTIC

L'application de la méthode DRASTIC dans la MRC de Portneuf a permis de mettre en évidence des problèmes relatifs à l'application de la méthode dans un contexte hors de celui pour lequel elle a été conçue par exemple au niveau de paramètres tels que la profondeur à la nappe. Le résultat de son évaluation donne une carte assez homogène pour l'ensemble de la MRC. De même pour le paramètre recharge, la cote maximale de 9 est attribuée pour des valeurs de recharge dépassant 250 mm/an. Or la recharge moyenne au Québec est de 300 mm/an (Aubre, 1992), ce qui engendre une carte de la recharge dont la cote est maximale sur une grande partie de la surface. Il s'agit donc de savoir si les classes sont adaptées à ce territoire, si la valeur de vulnérabilité ne s'en trouve pas modifiée et ainsi ne pas être représentative de la réalité.

Vrba et Zaporozec (1994) recommandent l'utilisation de méthodes standardisées pour l'estimation de la vulnérabilité. DRASTIC offre un potentiel important en ce sens. C'est une méthode qui a été largement appliquée de part le monde. Depuis sa conception en 1987, la méthode a été appliquée dans plus d'une quinzaine de régions différentes du globe ; aussi bien en Afrique (Lynch, 1994), en Suède (Rosen, 1994), aux États-Unis (Navulur *et al.*, 1995) et en Russie (Pukkoneni, Teiter, 1995). Elle a parfois été modifiée pour convenir à une utilisation dans un contexte particulier. Ainsi, de la méthode DRASTIC découle un certain nombre d'autres

méthodes. Il s'agit soit de DRASTIC modifié tel que la méthode développée par Aubre (1992) ou la méthode mis au point par le gouvernement italien (Vrba et Zaporozec, 1994), soit de DRASTIC utilisé partiellement comme c'est le cas avec la méthode développée par le département de la santé et du bien être d'Idaho (1991).

Si la méthode DRASTIC est l'une des plus utilisée (Tableau 13) c'est également, de ce fait, une des plus controversée.

Tableau 13: Exemples d'applications de la méthode DRASTIC.

Utilisateur	Organisme	Pays	Région	Année	Modification	Remarques	Critiques	Avantages
Atkinson S.F.	Université North Texas	États-Unis	Texas	1996	Aucune	Informatisation des données. But de ces cartes, protection des ressources en eaux souterraines du Texas.	Utilisation d'unités UTM. Ajout d'un programme de fusion de données si un paramètre manque	DRASTIC permet approche analytique spatiale. GIS conçu pour ça, ainsi réalisation de carte d'indice avec les GIS. Couche d'information est mise à jour pour chaque paramètre
Banton O.	INRS Eau	Canada	Montréal (Mirabel)	1988	Suppression de 3 paramètres	Communication orale	Méthode non appliquée telle que définie par les concepteurs.	
Champagne L., Chapuis R.	Ministère Environnement	Canada	MRC Montcalm	1993	Aucune	Territoire étudié de 722 km ² étendu sur 2 régions physiographiques		Une des remarques faite est qu'il serait intéressant de comparer les résultats de DRASTIC avec des méthodes de modélisation d'un aquifère local
Hart M.	Texas Water Commission	États-Unis	Texas	?				
Hiscock K.M., Lovett A.A., Braithard J.S., Parfitt J.P.	School Environment Sciences	Angleterre et pays de galles	centre et nord-ouest de l'Angleterre	1995		Utilisation du SIG IDRISI pour la réalisation de cartes de vulnérabilité		
Isabel D., Gélinas P.J., Aubre F., Bérault A.	GREGI	Canada	Québec	1990	Utilisation de 4 paramètres	Adaptation des paramètres et des cotations aux conditions hydrogéologiques québécoises		Intégration d'un facteur de confiance. Indice interprétable en terme de risque.
Kalinski R.J., Kelly W.E., Bogard I., Ehrman R.L., Yamamoto P.D.	Woodward-Clyde Federal Services	États-Unis	Nebraska	1994		Carte réalisée à l'échelle de 1/100000 sur la base d'informations au 1/250000 par des cellules de 640m par 600m		Comparaison des résultats obtenus avec DRASTIC avec des valeurs de fréquences de contamination aux VOC
Liddle S.K., Garley C.	Research Triangle Institute	États-Unis	États-Unis (évaluation entre région)	1988 ?	Modification des indices Pesticides DRASTIC selon Alexander & al.	Poids des facteurs de DRASTIC dépendent du pourcentage de zones caractérisées par des conditions hydrogéologiques	À chaque essai, nouveaux poids.	Permet une étude comparative des régions à l'échelle régionale
Lynch S.D.	Université Natal	Afrique du Sud	Pietermaritzburg	1994	Aucune	Précipitation presque 2 fois moins que la moyenne mondiale. Expression de la vulnérabilité en terme de qualité de la ressource.	Pour l'auteur: DRASTIC ne considère pas les impacts des activités humaines. Certains facteurs significatifs pour l'Afrique du Sud non pris en compte (dilution)	Caractère comparatif des résultats conserve la validité des conclusions malgré les estimations importantes.
Navulur K., Engel B.	Université Purdue	États-Unis	Indiana	1995	Division en 4 indices de vulnérabilité à des fins de comparaison avec d'autres méthodes	Essais d'utilisation des facteurs DRASTIC comme données d'entrées d'un modèle probabiliste (de probabilité Bayésiennes). Utilisation du coefficient de Pearson pour les comparaisons statistiques.	Validation effectuée sur un territoire pour lequel la méthode a été mise en place et seulement pour un type de polluant (Nitrate).	Appliquée à des fins de comparaisons par rapport à d'autres méthodes et par rapport à des mesures réelles: Méthode validée.
Pukkonen E., Teiter K.	Geological Survey Estonia	Estonie	Iles de Saaremaa	1995	Application basée en partie sur DRASTIC	GIS est le bon outil pour la réalisation de ces cartes du fait de la quantité d'informations à analyser en même temps		
Rosen L.	School Civil Engineering	Suède	Nykoping/ S et C Suède	1994	Aucune	Utilisation dans le roc cristallin fracturé	Poids et valeur des indices sont trompeurs. Différences entre milieu poreux et fracturé. Manque de démonstrations	Utilisation d'unités géologiques. Nombre et choix des paramètres et corrélation entre eux
Rupert M., Dace T., Maupin M., Wickersid B.	Département de la santé et du bien être d'Idaho	États-Unis	Idaho	1991	Utilisation de 3 paramètres sur 7 et indexation différente	Application en est à un stade préliminaire. Estimation de la recharge différente des autres méthodes	Méthode non validée.	Information utilisée est celle disponible.

D'après Lynch (1994), bien que les hypothèses de base de DRASTIC aient été critiquées (surtout la redondance des paramètres), la puissance de la méthode réside dans le fait qu'il considère la majorité des facteurs contrôlant la vulnérabilité. Une particularité intéressante de la méthode réside dans l'utilisation des unités hydrogéologiques car cela force l'utilisateur à raisonner en terme d'hydrogéologie régionale pour créer une base de classification (Rosen, 1994). En fait, très peu de méthodes utilisent les unités hydrogéologiques comme référence, alors que ce sont ces unités qui constituent la base quant à la possibilité de contamination d'un aquifère entier.

La redondance des paramètres est l'un des points controversé de cette méthode. La nécessité d'utiliser les 7 paramètres est donc sujet à controverse, certaines études démontrant que réduire le nombre de paramètres n'altère pas le résultat, d'autres spécifiant que chaque paramètre a son importance (Fagnan, 1998).

Les auteurs du modèle notamment parlent de redondance (Aller *et al.*, 1987) :

- ✓ La profondeur à la nappe qui affecte la quantité de matériel qu'un polluant va rencontrer en traversant le milieu est également pris en compte par le paramètre zone vadose.
- ✓ La topographie et le type de sol agissent tous deux sur la capacité d'infiltration, donc sur la recharge.
- ✓ La topographie exerce une action importante sur l'épaisseur de sol considérée.

D'après Aubre (1992), la profondeur à la nappe et la recharge constituent les paramètres les plus corrélés du fait que la recharge est dépendante de l'épaisseur de matériaux présente avant d'arriver à la nappe. D'après Van Stempvoort *et al.* (1992), le type de sol et la zone vadose sont des paramètres redondants puisque le sol fait parti de la zone vadose. De même pour les aquifères de surface, le type d'aquifère et le type de sol et la zone vadose sont redondants. Le paramètre recharge est un paramètre très difficile à évaluer surtout à l'échelle régionale. D'après Van Stempvoort *et al.* (1992) ce paramètre est largement dépendant du paramètre conductivité hydraulique de n'importe quelle couche confinante au-dessus de l'aquifère ou de l'aquifère de surface lui-même, il est donc plus utile de considérer le paramètre conductivité hydraulique dans les cartes de protection générales. Pour Van Stempvoort *et al.* (1992), le paramètre conductivité hydraulique est totalement redondant lorsqu'il est dérivé du paramètre «type d'aquifère». Ainsi il est très important pour n'importe quelle méthode que chaque paramètre soit estimé indépendamment des autres, avec des informations propres à ce paramètre. Le paramètre topographie doit être, d'après les auteurs, utilisé dans le cas d'études spécifiques.

La redondance des paramètres peut venir du fait qu'un processus peut être utilisé pour l'estimation de plusieurs autres. Pour réellement mettre en évidence la redondance des paramètres de manière objective, une étude de corrélation statistique est requise. Rosen (1994) a réalisé une étude de corrélation directe sur les paramètres de DRASTIC afin de déterminer quelle est la corrélation directe qui existe entre les paramètres et ainsi la redondance des paramètres. Il a procédé en ramenant la méthodologie DRASTIC à un système qui peut être décrit à l'aide d'une fonction de la forme :

Équation 2.4 :
$$u(X_1, \dots, X_n) = f[u_1(X_1), \dots, u_n(X_n)]$$

où u représente la fonction d'une série de paramètres x et u_i la fonction de chaque paramètre.

Chaque information de type vecteur (carte géologique, forages stratigraphique des puits etc.) est multipliée à une matrice de transformation qui permet d'obtenir les différentes informations sous forme d'indice pour chaque paramètre. Le résultat est un vecteur paramètre qui multiplié à une matrice poids (relatif à chaque paramètre) résulte en un vecteur indice final. À partir de là, il est facile d'étudier la corrélation entre chaque paramètre, à l'aide du coefficient de variation obtenu grâce au calcul de l'écart type et donc de la variance. Les résultats mis en évidence à partir des informations relevées en Suède (tiré de Gustafsson, 1970 dans Rosen, 1994) montrent des corrélations assez évidentes pour certains paramètres comme la recharge et le type d'aquifère (80%), la recharge et la conductivité hydraulique (81%), et aussi le type d'aquifère et l'impact de la zone vadose (99%), l'aquifère et la conductivité hydraulique (99%), et la conductivité hydraulique et l'impact de la zone vadose (99%) (Rosen, 1994).

Une des conclusions de Rosen (1994), qui rejoint celle d'autres auteurs, est que la redondance des paramètres tend à diminuer la variabilité des résultats. En effet la probabilité qu'un jugement propre à un utilisateur au niveau d'un paramètre affecte l'indice final de vulnérabilité s'affaiblit avec la quantité de paramètres à prendre en compte. De même dans le cas d'une erreur d'évaluation, cette erreur peut être compensée par l'évaluation d'un autre paramètre redondant à celui erroné.

En ce qui concerne le poids attribué à chaque paramètre, d'après Rosen (1994) et Van Stempvoort *et al.* (1992), les poids sont affectés de manière empirique et peu d'études sont réalisées pour valider l'assignation empirique de ces poids. D'après Van Stempvoort *et al.* (1992), les auteurs

donnent trop d'importance à certains paramètres (comme la topographie) et pas assez à d'autre, notamment ceux qui font référence au rôle des couches confinantes.

Enfin DRASTIC ne tient pas compte d'un certain nombre de paramètres physiques qui ont une forte influence sur la pollution tels que les fractures et les failles, les effets de la durée et de l'intensité des précipitations, la réactivité du sol, les différences dans la mobilité spécifique à un contaminant, l'anisotropie et l'hétérogénéité du sol, la zone vadose et la conductivité hydraulique de l'aquifère. La dilution n'est pas considérée, ce qui peut être un facteur significatif dans les conditions de faibles capacités d'emmagasinement et présence de roc qui prévalent dans une grande partie de l'Afrique du Sud (Lynch, 1994). Selon Trojan et Perry (1988) il est théoriquement incorrect de prédire la sensibilité des eaux souterraines en ne tenant compte que de l'évaluation des facteurs hydrogéologiques. En effet la contamination des eaux souterraines, d'après ces auteurs, est le résultat de divers processus physiques, mieux décrits par des équations mathématiques.

2.4.1.4 Données

Les données utilisées pour cartographier chacun des paramètres sont :

- La profondeur à la nappe : les données de **niveau d'eau**, la **carte du réseau de drainage**, la **carte topographique**.
- La recharge: La **carte des sols**, la **carte d'utilisation des sols**, les **données météorologiques**, la **carte topographique**.
- Le type d'aquifère: la **carte des formations superficielles** et du **socle rocheux**, des **rapports hydrogéologiques**.
- Le type de sol: la **carte des sols**, et le rapport de reclassification des sols.
- La topographie: le **modèle numérique de terrain (MNT)**, la **carte topographique**.
- L'impact de la zone vadose: la **carte des formations superficielles** et les **descriptions de forages**.
- La conductivité hydraulique: les résultats d'**analyse granulométrique** et les résultats d'**essais de pompage**.

Les cartes relatives à chaque paramètre ont été réalisées sous Mapinfo. L'intégration de ces 7 paramètres en une carte de vulnérabilité a été réalisé sous IDRISI, ce logiciel permettant

d'effectuer des traitements mathématiques essentiels à la compilation des résultats de chaque couche de données.

2.4.1.5 Application

La carte de la MRC de Portneuf a été réalisée en 1997. Les explications relatives à cette carte sont basées sur les travaux de Fagnan (1998).

- La détermination des unités hydrogéologiques est réalisée à partir de la carte des formations superficielles (Cloutier *et al.*, 1997) dont le niveau est très détaillé et dans certains cas de la description des forages contenus dans la base de données. Les limites des unités hydrogéologiques correspondent dans la plupart des cas aux contours des unités quaternaires. Certaines unités quaternaires ont été regroupées pour former une unité hydrogéologique lorsque les propriétés du milieu le permettent. 18 unités hydrogéologiques ont ainsi été identifiées. Les contextes hydrogéologiques présents dans la région d'étude peuvent être identifiés à partir des séries d'unités hydrogéologiques retrouvées dans le guide de la méthode DRASTIC. Certaines unités décrites dans ce guide peuvent correspondre avec les contextes géologiques québécois, mais pas exactement, l'identification des unités hydrogéologiques dans la MRC a donc été réalisée à partir des modifications d'unités élaborées par Champagne (1990) mais également à partir de développement de nouvelles unités spécifiques à certains dépôts de la MRC (Fagnan, 1998).
- A l'intérieur de chaque unité hydrogéologique les paramètres vont être déterminés et les cartes de chaque paramètre DRASTIC vont être élaborées. Une grande quantité d'information peut être nécessaire afin de bien évaluer les sept paramètres DRASTIC. Si les informations manquent, le manuel DRASTIC prévoit des cotes types à donner à chacun des paramètres à l'intérieur de chacune des unités hydrogéologiques. Dans le cas où les informations pourraient être obtenues, chacun des sept paramètres est à évaluer.

Il est possible d'utiliser cette méthode pour les aquifères confinés et les aquifères libres, mais, il faudra le faire séparément. Les informations disponibles pour l'étude permettraient d'élaborer la carte des aquifères confinés, mais difficilement. La carte serait très vague, il a donc été décidé de ne pas en tenir compte ici.

2.4.2 La méthode GOD

2.4.2.1 Théorie

Cette méthode empirique a été conçue en Angleterre en 1987 par Foster. L'appellation de la méthode provient d'un acronyme : *Groundwater occurrence* (type d'aquifère), *Overall aquifer class* (caractéristiques de l'aquifère en terme de lithologie et porosité), *Depth to water table* (profondeur à la nappe).

Il est important de préciser que souvent les composantes nécessaires à l'estimation de la vulnérabilité sont obtenus, par cette méthode, à partir de la combinaison de différents facteurs (Tableau 14). Les informations relatives à ces facteurs ne sont pas toujours disponibles, une réduction et une simplification des paramètres sont alors obligatoires.

Tableau 14 : Principaux facteurs contrôlant la vulnérabilité des aquifères à la pollution (modifié de Foster et Hirata, 1991).

Composantes de vulnérabilité des aquifères à la pollution	INFORMATION HYDROGÉOLOGIQUE	
	<i>Idéalement requis</i>	<i>Généralement disponible</i>
<i>Inaccessibilité hydraulique</i>	<ul style="list-style-type: none"> - degré de confinement de l'aquifère - profondeur du niveau d'eau ou direction d'écoulement - teneur en eau de la zone non saturée - conductivité hydraulique verticale de l'aquitard 	<ul style="list-style-type: none"> - type de contaminant des eaux souterraines - profondeur de l'eau souterraine
<i>Capacité d'atténuation</i>	<ul style="list-style-type: none"> - distribution de la taille des grains et des fissures de l'aquiperme ou de l'aquitard - minéralogie de la matrice ou aquitard 	<ul style="list-style-type: none"> - degré de consolidation / fissuration de l'aquitard - caractéristiques lithologique de l'aquitard

L'établissement de cette méthode est basée sur quatre points :

- 1) La vulnérabilité des aquifères est logiquement une fonction de a) l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens hydraulique de pénétration du polluant et de b) la capacité d'atténuation de la couche supérieure de la zone saturée comme résultat de la rétention physique et des réactions chimiques avec les contaminants.
- 2) Les deux propriétés énoncées ci-dessus interagissent avec celles correspondant à la mise en place des contaminants près de la surface c'est-à-dire a) Le mode de répartition d'un contaminant proche de la surface, et en particulier la magnitude de la charge hydraulique associée et b) la classe du contaminant en terme de mobilité et de persistance.

C'est cette interaction qui déterminera la résidence dans la zone non saturée et la capacité d'atténuation, de rétention ou d'élimination du contaminant avant d'arriver à l'aquifère.

3) Il est plus réaliste d'évaluer la vulnérabilité par contaminant, classe de contaminant ou par groupe d'activités polluantes plutôt que de parler globalement de vulnérabilité.

4) Les cartes de vulnérabilités sont représentatives sous forme de cartes, mais la conclusion logique d'une telle étude est une série de cartes spécifiques compilées sous forme d'atlas.

Les éléments nécessaires pour le schéma de protection des eaux souterraines et pour la classification de la vulnérabilité des aquifères sont : le type de sol, les formations géologiques, la lithologie des lits confinants de la zone non saturée, la profondeur à la nappe.

La méthodologie empirique proposée en 1987 par Foster, implique un certain nombre d'étapes pour la réalisation de la carte (Figure 9) :

(1) l'identification du type d'aquifère, avec une échelle de 0 à 1.

(2) la spécification des couches au-dessus de l'aquifère en terme de degré de consolidation donc indirectement de présence ou non de perméabilité de fissure, de caractéristiques lithologiques et donc indirectement de porosité relative, de perméabilité, de contenu en eau de la zone non saturée. L'échelle va de 0.4 à 1.0 avec un suffixe « F » ou « FF » dans le cas de fissuration ou de faible capacité d'atténuation. Pour l'évaluation de ce paramètre, une subdivision descriptive des dépôts géologiques peut être utilisée (la taille des grains, les caractéristiques minérales). Les éléments tels que *residuals soils* et *desert calcretes* ont été pris en compte du fait de leur distribution importante.

(3) la profondeur à la nappe dans le cas d'aquifère non confiné et confiné. L'échelle va de 0.4 à 1.0.

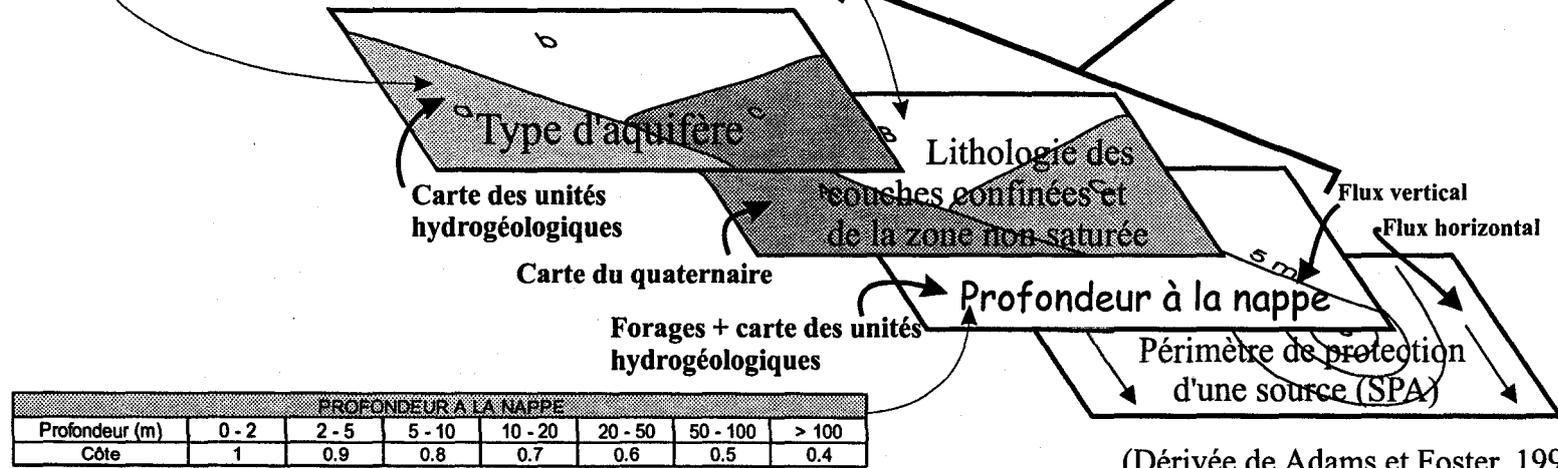
Remarque : Il est à noter, qu'une activité humaine telle que la surexploitation d'une nappe va influencer le degré de confinement de l'aquifère, mais cela n'apparaît pas dans le schéma proposé.

Figure 9 : La méthode GOD, paramètres et cotation.

Type d'aquifère	Côte
aucun aquifère	0
aquifère confiné et artésien	0.1
aquifère confiné et artésien	0.2
aquifère semi-confiné	0.3
aquifère avec couverture de surface	0.4 - 0.6
aquifère non confiné	0.7 - 1
Lithologie de l'aquifère ou de l'aquifère	côte
sol résiduel	0.4
limon alluvial; loess; shale; calcaire fin	0.5
sable éolien; siltite; tuf; roche ignée et métamorphique fracturée	0.6
sable et gravier; grès; tuf	0.7
gravier (colluvion)	0.8
calcaire	0.9
calcaire fracturé ou karstique	1

Indice de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité	Définition du degré
0	aucune vulnérabilité	
0 - 0.1	vulnérabilité négligeable	couches confinantes présentes sans écoulement vertical significatif
0.1 - 0.3	faible vulnérabilité	seulement vulnérable à long terme aux polluants conservateurs lorsque la décharge se fait en continu
0.3 - 0.5	vulnérabilité modérée	vulnérable à certains polluants mais seulement lorsque la décharge est continue
0.5 - 0.7	vulnérabilité élevée	vulnérable à beaucoup de polluants excepté ceux hautement absorbés ou transformés
0.7 - 1	vulnérabilité extrême	vulnérable à beaucoup de polluants de l'eau avec un impact rapide sur la pollution

Vulnérabilité de l'aquifère à la pollution (APV)



(Dérivée de Adams et Foster, 1992)

Il en résulte un **Indice** de vulnérabilité :

$$I = C_A * C_L * C_D$$

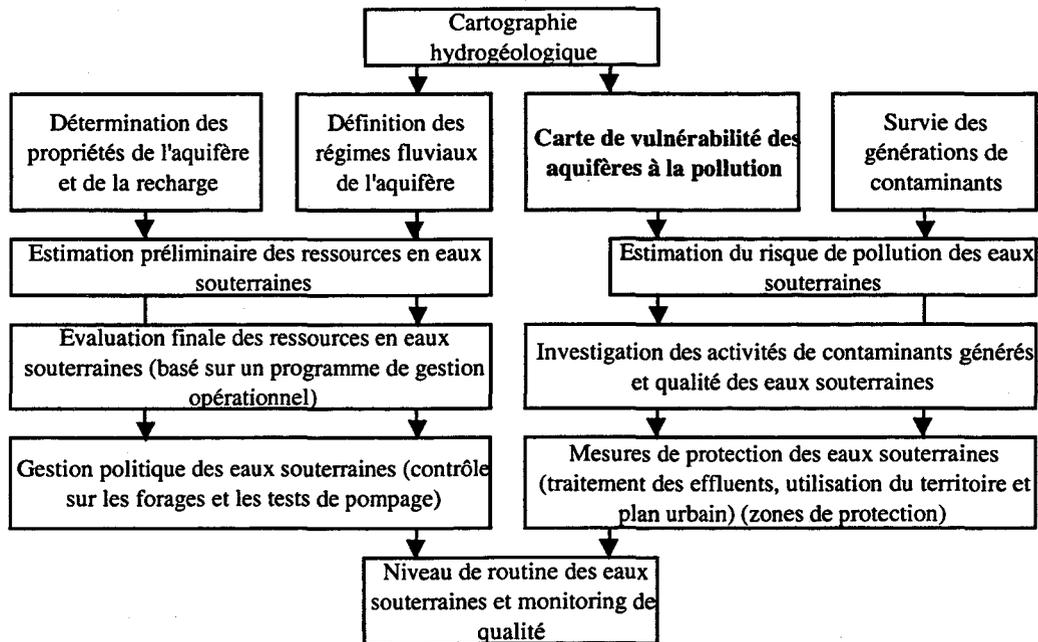
Où C_A représente l'aquifère; C_L représente la lithologie de la zone vadose et C_D représente la profondeur à la nappe.

La vulnérabilité augmente avec l'indice, la classification (en 5 classes) effectuée à partir de ces indices est celle spécifiée dans le tableau de droite de la Figure 9 :

2.4.2.2 Particularité de la méthode

La carte de vulnérabilité s'inscrit comme carte intermédiaire à la réalisation d'une carte de monitoring selon le schéma suivant défini par les concepteurs de la méthode (Tableau 15).

Tableau 15 : Position de la carte d'estimation de la vulnérabilité dans le schéma de l'évaluation de l'aquifère et par rapport à la carte d'évaluation du risque.



En effet dans le cas de cette méthode, la carte de vulnérabilité intrinsèque représente la première étape de l'évaluation au risque. la classification des aquifères déduite de cette carte n'est qu'un outil destiné à l'estimation du risque de pollution des eaux souterraines. L'évaluation du risque se fait en comparant l'échelle de vulnérabilité obtenue avec une échelle reliée au type de contaminant. En ce qui concerne cette seconde échelle, il est important de noter qu'elle dépend non seulement du contaminant (mobilité et persistance, temps d'application, mode

d'entreposage), mais également de la ressource en eau souterraine (existence de ressources alternatives, qualité naturelle de l'eau souterraine, usagers existants et potentiels) (Aubre, 1992).

Remarque : L'interaction entre les composants qui permettent l'estimation de la vulnérabilité et ceux engendrés par le dépôt des contaminants est très complexe. Si on parle de contaminants très mobiles et persistants, la cotation du risque va prédominer sur la cotation de la vulnérabilité.

2.4.2.3 Limitations

Un des problèmes d'une évaluation régionale est la présence de petits aquifères dont on ne peut pas toujours tenir compte, ainsi Foster (1998) recommande dans toute évaluation : (1) d'utiliser la lithologie prédominante des couches au-dessus de l'aquifère; (2) s'il y a des doutes quant à la continuité et les propriétés des lits confinants, les aquifères doivent être considérés comme non confinés; (3) les aquifères peu profonds sont utilisés pour évaluer le risque à la pollution, sauf dans le cas de petites nappes perchées.

Le choix de l'échelle se fait au départ, la carte ne peut être utilisée à une autre échelle que celle à laquelle elle a été conçue.

2.4.2.4 Données

Les informations utilisées pour la réalisation de la carte de vulnérabilité GOD ont été obtenues à partir des cartes et informations utilisées pour la méthode DRASTIC puis pour les autres méthodes.

- la **carte des unités hydrogéologiques**. Cette carte avec la **carte des formations superficielles** sert à la détermination du type d'aquifère (confiné, non confiné, semi-confiné etc...).

- la **carte des formations superficielles** qui a été modifiée pour la méthode du Minnesota sert de base à la réalisation de cette carte. Chacune des formations est répertoriée en fonction de la classification de la méthode GOD par rapport à celle de la méthode du Minnesota.

- la **carte profondeur à la nappe** de la méthode DRASTIC a servi de référence pour la réalisation de la carte de profondeur à la nappe nécessaire à l'élaboration de la carte. Le découpage de ce paramètre selon DRASTIC est modifiable pour la méthode GOD, sans engendrer un biais important, étant donné la précision des mesures et le fait que les profondeurs maximales de la MRC de Portneuf se situent aux alentours des 20 m de profondeur.

2.4.2.5 Application

Pour l'élaboration de cette carte de vulnérabilité, 3 paramètres sont à définir, le type d'aquifère, la lithologie de la zone vadose et la profondeur à la nappe. Le type d'aquifère est déterminé à partir de la définition des formations superficielles présentes dans la MRC de Portneuf mais surtout à partir des unités hydrogéologiques (définies en partie grâce à la carte des formations superficielles) mises en évidence lors de l'étude de cartographie hydrogéologique (Tableau 16).

Tableau 16 : Correspondance des unités hydrogéologiques de la MRC avec les types d'aquifères proposés pour GOD.

Unité hydrogéologique	cote	type d'aquifère
sables et graviers deltaïques	1	non confiné
moraine de saint-narcisse	1	
till sur roches ignées et métamorphiques	1	
sables littoraux	1	
sables et graviers fluvioglaciaires	1	
alluvions de plaines d'inondation	1	
rampes rocheuses de la plateforme paleozoïque	1	
sables de hautes terrasses	1	
sables de hautes terrasses sur sables et graviers deltaïques	1	
till en couverture continue sur roches ignées/ métamorphiques	2	
till sur roches sédimentaires	3	semi-confiné
roches ignées et métamorphiques recouvertes par argiles	4	confiné
roches sédimentaires et ignées recouvertes par argile	4	

La lithologie de la zone non saturée est le second paramètre à évaluer. La carte des formations superficielles est modifiée de manière à obtenir une coïncidence des formations superficielles présentes dans la MRC par rapport aux formations typiques cotés par la méthode (Tableau 17). La carte obtenue est une carte des formations superficielles regroupées selon leurs propriétés hydrogéologiques.

Tableau 17 : Formations présentes dans la MRC et coïncidence avec les formations proposées par la méthode GOD.

Nom	Matériau	Conductivité hydraulique (cm/s)	Matériel géologique associé selon la méthode GOD	Cote
Q	Formations quaternaires non différenciées		grès (F)	0.7
Tv	Till en couverture discontinue		sols résiduels	0.4
T	Till en couverture généralement continue			0.4
O	Dépôts organiques			0.5
Tvr	Till remanié en couverture discontinue	1.00E-05	sables et graviers alluviaux et fluvio-glaciaires	0.65
Tt	Till remanié	1.00E-05		0.65
Gst	Sédiments de la moraine frontale de Saint-Narcisse	7.94E-06		0.6
At	Alluvions des terrasses fluviales	1.00E-04		0.7
Gs	Sédiments juxtaglaciaires	1.00E-04		0.7
Ga	Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique	1.00E-04		0.7
Go	Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien	1.00E-04		0.65
Mb	Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation	7.31E-05		0.65
Ma	Sédiments deltaïques	2.97E-04		0.7
Lb	Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation	1.24E-04		0.7
Ld	Sédiments deltaïques	1.00E-04	0.7	
Ms	Sédiments fins d'eau profonde	5.32E-08	loess silteux alluviaux	0.5
Mp	Sédiments remaniés par des glissements de terrain	1.00E-08	graviers de colluvions	0.5
Ap	Alluvions actuelles	1.00E-04		0.8
R+	Roches sédimentaires paléozoïques		calcaires (FF)	0.9FF
R	Roches métamorphiques et magmatiques précambriennes		formations ignées/métamorphiques + vieilles formations volcaniques	0.6

Le troisième paramètre à définir est la profondeur à la nappe. Le découpage de la carte des profondeurs à la nappe par intervalle a été réalisé à partir de la carte de profondeur à la nappe de la méthode DRASTIC. L'échelle, la précision des mesures et le fait que les profondeurs à la nappe maximales rencontrées dans la MRC de Portneuf soient de 20m pour une évaluation allant jusqu'à 100m pour la méthode GOD, font que la carte de profondeur à la nappe de DRASTIC peut être modifiée sans engendrer de biais important (Tableau 18).

Tableau 18 : Variation de la cotation de la profondeur selon GOD et DRASTIC.

GOD	cote	DRASTIC	cote
< 2m	1	0 - 1.5 m	10
2-5 m	0.9	1.5 - 4.5 m	9
5- 10 m	0.8	4.5 - 9 m	7
10 - 20 m	0.7	9 - 15 m	5
		15 - 23 m	3
20 - 50 m	0.6	23 - 31 m	2
50 - 100 m	0.5	> 31 m	1
> 100m	0.4		

Ces cartes ont été réalisées sous Mapinfo car toutes les cartes de base à la réalisation de chacune des cartes étaient des cartes de format Mapinfo. Les trois cartes ainsi réalisées (carte du type d'aquifère, carte des formations et carte de profondeur à la nappe) ont été affectées d'une colonne

cotation qui a servi de champ de référence lors du passage des cartes format Mapinfo aux cartes format IDRISI.

Le problème alors rencontré était relié au fait que la méthode GOD n'utilise pas un système de cotation par entier, mais par décimale. Les cotes décimales de chaque paramètre sont multipliées pour obtenir une cote finale entre 0 et 1 (l'indice de vulnérabilité). IDRISI lui ne fonctionne qu'en entier, il a donc fallu modifier les cotations de chaque paramètre, superposer les cartes mais en additionnant les cotes plutôt qu'en les multipliant, puis la cote finale a été modifiée selon un système matriciel sachant qu'à un nombre généré par IDRISI correspondait une cote précise générée par la méthode GOD.

La carte finale obtenue se compose de 6 indices de vulnérabilité : aucune vulnérabilité, vulnérabilité négligeable, faible vulnérabilité, vulnérabilité moyenne, forte vulnérabilité, vulnérabilité extrême. On peut réduire ce nombre d'indice à 5 sachant que la définition « d'aucune vulnérabilité » revient à avoir un indice de 0. Or, définir une zone comme non vulnérable est erroné.

2.4.3 La méthode du département des ressources naturelles du Minnesota

2.4.3.1 Théorie

La méthode du Minnesota a été développée dans les années 1990 par le département des ressources naturelles du Minnesota. Elle utilise trois niveaux de cartographie pour estimer la vulnérabilité (Figure 10). Les critères d'estimation de sensibilité de l'eau souterraine sont basés sur les propriétés des matériaux géologiques (notamment la porosité et la perméabilité) recouvrant la nappe phréatique. La sensibilité du matériel est déterminée grâce au « temps de parcours » des éléments tels que l'utilisation du sol, les effets des saisons n'étant pas pris en compte.

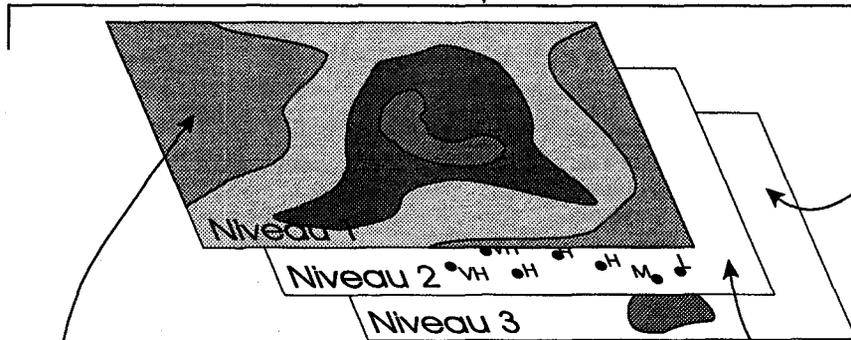
Figure 10 : La méthode Minnesota, paramètres et cotation

Informations nécessaires pour compléter l'estimation de la sensibilité géologique à chacun des 3 niveaux.			
Informations nécessaires à l'évaluation de la sensibilité géologique	Niveau d'estimation		
	1	2	3
Texture du sol / matériau parent	X		
Profondeur à la nappe	X	X	
Matériel de la zone vadose		X	
Aquifères profonds / unités confinantes			X

Niveau 3 - Aquifères profonds

Identification des aquifères profonds
différence de charge entre deux puits rapprochés
conditions insaturées dans un aquifère sous le niveau de la nappe
une couche de shale, d'argile, d'argile lacustre, de till argileux ou de till loameux argileux de 10 pieds sous la surface
Différences dans la chimie des eaux souterraines entre deux aquifères

Procédure pour calculer l'indice "L" aquifères profonds	
Étape 1.	épaisseur de chaque couche confinante/10 = valeur approximée de "L"
Étape 2.	valeur de "L" arrondie au nombre entier le plus proche pour obtenir l'indice "L" de la couche confinante
Étape 3.	ajout de l'indice "L" de chaque couche confinante pour obtenir un indice total pour les aquifères. Si l'indice est égal ou supérieur à L-5 le taux de sensibilité est "Very Low".



Niveau 1 - Estimation préliminaire de la sensibilité géologique

Matériel géologique	Indice de sensibilité	
	Profondeur à la nappe	
	< 1.83 m	> 1.83 m
Dépôts non consolidés		
épandage fluvioglaciale, sables et graviers glaciolacustres	Very High	Very High
sables des terrasses et dépôts graveleux	Very High	Very High
Matière organique, tourbe	High	Moderate
Loess, silt des terrasses et formations fluvioglaciales et sable fin	High	High
till silto-sableux, till sablo-silteux	High	Moderate
Alluvion, colluvion	High	Moderate
till, till argileux silteux, till argileux	Moderate	Low
argile glacio-lacustre et argile silteuse	Moderate	Low
socle rocheux ou résidu de socle rocheux		
calcaire, dolomie	Very High	Very High
grès	Very High	High
roches ignées et métamorphiques	High	High
Siltstone	Moderate	Moderate
Shale	Low	Low

Matériaux géologiques définis comme matériau confinant
dépôts non consolidés
argile lacustre
till argileux
till loameux argileux
socle rocheux
Shale
terminologie "Générique" utilisée dans l'annuaire des puisatiers
"argile"

	Classification des matériaux à la surface de la nappe								
	1 (karst)		2		3		4		
Épaisseur totale de la zone vadose (pieds)	<20	20-50	>50	<20	>20	<20	>20	<20	>20
UNITÉS DE FAIBLE ET MOYENNE PERMEABILITE DANS LA ZONE VADOSE									
pas d'unité de faible ou moyenne perméabilité	Très fort (VH)	Très fort (VH)	Très fort (H)	Très fort (VH)	fort (H)	Moderé (M)	Moderé (M)	Faible (L)	Faible (L)
ensemble de minces unités de faible perméabilité > à 10 pieds	-	fort (H)	Moderé (M)	-	Moderé (M)	-	Moderé (M)	-	Faible (L)
une unité de perméabilité moyenne > à 20 pieds	-	fort (H)	Moderé (M)	-	Moderé (M)	-	Moderé (M)	-	Faible (L)
une unité de faible perméabilité > à 10 pieds	-	Moderé (M)	Faible (L)	-	Faible (L)	-	Faible (L)	-	Faible (L)

Niveau 2 - Zone vadose

Ici la sensibilité géologique est définie comme proportionnelle au temps nécessaire à un contaminant pour migrer de la surface à l'aquifère. Le Tableau 19 permet de classer la sensibilité géologique en fonction du temps de parcours (les classes se recoupent en raison des incertitudes d'estimation du temps de parcours) :

Tableau 19 : Classification de la sensibilité selon la méthode du Minnesota.

Classes des sensibilités géologiques	Temps de parcours estimé de la migration vertical de l'eau
Très élevé	de quelques heures à quelques mois
Élevé	de quelques semaines à quelques années
Modéré	de quelques années à quelques dizaines d'années
Faible	de quelques dizaines d'années à un siècle
Très faible	Plusieurs siècles (seulement utilisé dans le niveau 3)

Le matériel géologique est défini par sa minéralogie et sa composition texturale. Les propriétés texturales interprétées comme la perméabilité du milieu, sont utilisées ici afin de déterminer le temps de parcours vertical (une faible perméabilité entraîne un faible mouvement vertical du contaminant).

La particularité de cette méthode réside dans l'élaboration de la carte en trois couches :

Niveau 1 :

La carte de niveau 1 donne un aperçu général de la vulnérabilité de la zone vadose à la pollution et donc de ce fait la vulnérabilité de l'aquifère. Elle estime la perméabilité verticale de la zone vadose basée sur le matériel géologique présent au niveau de la nappe. La procédure ne nécessite pas l'achat de matériel coûteux et ne nécessite pas plus d'informations que celles disponibles au moment de la réalisation de la carte, ce qui permet une première approximation de la sensibilité de la surface de la nappe. La carte de sensibilité peut être réalisée à une échelle pouvant s'appliquer à des zones relativement petites.

Niveau 2 :

La carte de niveau 2 permet d'affiner les résultats obtenus avec la carte de niveau 1 dans les zones où les informations sont plus disponibles. Au lieu de se baser uniquement sur les informations de surface, les informations géologiques plus profondes vont permettre de définir l'épaisseur de la zone vadose, la composition des matériaux géologiques de la zone non saturée. Cette procédure évalue mieux la sensibilité de la ressource eau souterraine car elle considère la variabilité du matériel géologique de la surface à la nappe. Les procédures pour une estimation de niveau 2 peuvent être appliquées sur de faibles surfaces si assez d'informations sont disponibles.

Niveau 3 :

La carte de niveau 3 permet de traiter les zones confinées à partir des données de puits ou des cartes géologiques. Elle évalue la sensibilité géologique des aquifères profonds, et les séparent des aquifères de surface. Ces aquifères sont évalués par la présence d'une couche confinante. Dans la présente étude on ne s'occupe pas d'évaluer la vulnérabilité des aquifères profonds. Lorsque cette procédure est utilisée avec une estimation de niveau 2, cela permet une estimation initiale complète de la sensibilité géologique du système d'eau souterraine en entier. Certains aquifères profonds peuvent passer de conditions confinées à condition libre à l'intérieur d'une même zone d'estimation. Dans ce cas la portion non confinée de cet aquifère est estimée pendant la procédure de niveau 2.

Les informations générales nécessaires pour compléter l'estimation de la sensibilité géologique de chacun des 3 niveaux sont les suivantes (Tableau 20) :

Tableau 20 : Paramètres nécessaires à la réalisation des cartes de vulnérabilité de la méthode du Minnesota (the geologic sensitivity project workgroup, 1991).

<i>Informations nécessaires pour compléter l'estimation de la sensibilité géologique à chacun des 3 niveaux.</i>			
Informations nécessaires à l'évaluation de la sensibilité géologique	Niveau d'estimation		
	1	2	3
Texture du sol / matériau parent	X		
Profondeur à la nappe	X	X	
Matériel de la zone vadose		X	
Aquifères profonds / unités confinantes			X

Selon les utilisations et l'échelle à laquelle les cartes sont réalisées, le niveau d'estimation suggéré ne sera pas le même. Les utilisations possibles des cartes ainsi établies peuvent, d'après les auteurs de ces cartes, être séparées en 4 : organisation, réglementation/gestion, mise en œuvre de programme, enseignement. Le niveau 1 est le niveau minimal requis pour les quatre catégories. Ce niveau fournit les informations minimales nécessaires pour identifier les zones recherchées (zones de surface). Le niveau 2 est le niveau minimal requis dans l'évaluation préliminaire de site pouvant produire des contaminants. Ce niveau fournit un niveau de confiance plus élevé pour les aquifères de surface que le niveau 1. Le niveau 3 est indiqué pour les petites activités. Bien que ce niveau soit associé aux aquifères profonds, il est suggéré pour l'identification de zones produisant des contaminants.

2.4.3.2 Limitations

Un certain nombre d'hypothèses sont émises : (1) Le contaminant possède les caractéristiques de l'eau; (2) Le contaminant possède des caractéristiques chimiques conservatrices et persistantes; (3) Le contaminant est déversé sur ou proche de la surface du sol; (4) L'écoulement du contaminant se fait verticalement et vers le bas.

Chaque niveau a ses propres limites :

Niveau 1 :

- 1) la préparation de cartes peut prendre du temps, et certaines cartes ne peuvent être mises ensembles.
- 2) l'estimation de la sensibilité estime les conditions de la zone vadose à partir d'information de la surface. Ce niveau ne considère pas les aquifères profonds.
- 3) il ne s'agit que d'un premier pas dans la documentation des zones géologiquement sensibles.

Niveau 2 :

- 1) ce niveau demande une certaine connaissance des conditions hydrogéologiques locales.
- 2) il ne peut être complété sans une carte du quaternaire détaillée.
- 2) il ne considère pas les aquifères profonds. Ainsi la sensibilité d'un aquifère dont les conditions géologiques changent d'une nappe libre à une nappe confinée ne peut être définie.
- 4) sa réalisation demande du temps et de l'argent.

Niveau 3 :

- 1) ce niveau nécessite beaucoup de données géologiques de profondeur en plus.
- 2) il ne peut être réalisé sans une récolte d'information géologique et hydrologique des eaux souterraines importante.
- 3) sa réalisation demande du temps et de l'argent.

Ce type de carte nécessite la simplification des processus considérés et ne peut donc donner de réponse finale quant à l'utilisation du sol. Les interrelations entre la surface et l'eau souterraine (comme les précipitations qui migrent effectivement de la surface à l'eau souterraine), si elles ne sont pas considérées ici, doivent être considérées dans le plan d'aménagement des sols.

2.4.3.3 Données

Pour la carte de niveau 1, les informations utilisées sont :

- la **carte des formations superficielles** modifiée. Lorsque plusieurs formations sont spécifiées c'est la première qui est prise en compte même si elle n'est pas très importante car c'est elle qui forme la surface. Chacune des formations superficielles est répertoriée selon la classification déterminée par la méthode en 13 classes.
- la **carte de profondeur à la nappe** sert à déterminer si la nappe est à plus de 2 m de profondeur. Cette information vient compléter la précédente pour déterminer l'indice de vulnérabilité.

Pour la carte de niveau 2 les informations utilisées sont :

- la **banque de données** de la CGC-Québec dans laquelle se trouve les données de forage des puisatiers répertoriés par le MENVQ pour la MRC de Portneuf (Fagnan, 1998).
- la **carte des points de piézométrie** détermine le niveau de la nappe dans le bassin de la rivière Jacques-Cartier et le sud-est du bassin de la rivière Sainte-Anne. Dans ce fichier se trouvent également les informations relatives à la stratigraphie. Dans le cas où elles n'y sont pas la banque de données permet de compléter l'information.
- le **quadrillage des profondeurs à la nappe** estimées sert à compléter l'information de la banque de données, et permet de connaître la profondeur de la nappe (estimée) au niveau de chacun des puits de forage et donc de déterminer le matériel au niveau de la nappe et la présence de zones peu perméables dans la zone vadose.
- les valeurs de **perméabilité des formations superficielles**. Les données de perméabilité existantes pour la MRC sont des valeurs moyennes de perméabilité pour chaque type de formation quaternaire (Larose-charette, 2000).

2.4.3.4 Application

Cette méthode utilise trois niveaux de cartographie pour estimer la vulnérabilité. La carte de niveau 1 donne un aperçu général de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. La carte de niveau 2 permet d'affiner les résultats obtenus avec la carte de niveau 1 dans les zones où plus d'informations sont disponibles. La carte de niveau 3 n'a pas été réalisée dans le cadre de l'étude. Il en résulte trois cartes superposées. La première comporte les résultats les moins complets mais couvre la zone entière.

A - Carte de niveau 1 :

Selon la méthodologie, la carte à utiliser est la carte pédologique, traitée de manière à obtenir une carte géologique basée sur les matériaux et la texture dont découlent les unités pédologiques. La

méthode préconise l'utilisation des données disponibles. Or dans ce projet, l'information disponible est importante dès le premier niveau. Ainsi, dans notre cas la carte des formations superficielles est disponible sur l'ensemble du territoire et son niveau de fiabilité et de détail est bon, ce qui a permis de définir directement le matériel primitif. Ceci revient à faire une carte de niveau 2 i.e. une carte dont l'indice de fiabilité est plus important que pour une carte de niveau 1 conventionnelle. Le regroupement des unités quaternaires a été réalisé selon le schéma du Tableau 21 :

Tableau 21 : Formations présentes dans la MRC de Portneuf d'après la carte quaternaire et coïncidence avec les formations proposées par la méthode du Minnesota (niveau 1).

Nom	Matériau	Matériel géologique associé selon la méthode
Q	Formations quaternaires non différenciées	grès
Tv	Till en couverture discontinue	till, till argileux silteux, till argileux
T	Till en couverture généralement continue	
Tvr	Till remanié en couverture discontinue	till silto-sableux, till sablo-silteux
Tr	Till remanié	
Qst	Sédiments de la moraine frontale de Saint-Narcisse	
Al	Alluvions des terrasses fluviales	épandage fluvio-glaciaire, sables et graviers glacio-lacustres
Gr	Sédiments juxtaglaciaires	
Gs	Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique	
Go	Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien	
Ma	Sédiments fins d'eau profonde	argile glacio-lacustre et argile silteuse
Mg	Sédiments remaniés par des glissements de terrain	
Mb	Sédiments littoraux, pré littoraux et d'exondation	sable des terrasses et dépôts graveleux
Md	Sédiments deltaïques	
Lb	Sédiments littoraux, pré littoraux et d'exondation	
Ld	Sédiments deltaïques	
Ap	Alluvions actuelles	alluvions, colluvions
O	Dépôts organiques	matière organique, tourbe
R+	Roches sédimentaires paléozoïques	calcaire, dolomie
R	Roches métamorphiques et magmatiques précambriennes	roches métamorphiques et ignées

L'information est alors couplée avec la profondeur à la nappe, ce qui permet de déterminer les indices de vulnérabilité (Tableau 22).

Tableau 22 : Indices de vulnérabilité correspondant aux formations superficielles rencontrées pour Minnesota (niveau 1).

Nom	Référence de la méthode	Profondeur à la nappe	
		< 1.83 m	> 1.83 m
Q	grès	VH	H
Tv	till, till argileux silteux, till argileux	M	L
T			
Tvr	Till silto-sableux till sablo-silteux	H	M
Tr			
Gxt			
Gx	Épandage fluvio-glaciaire, sables et graviers glacio-lacustres	VH	VH
Gs			
Go			
Ma	Argile glacio-lacustre & argile silteuse	M	L
Mg			
Mb	Sable des terrasses & dépôts graveleux	VH	VH
Md			
Lb			
Ld			
At			
Ap			
O	alluvions, colluvions	H	M
R+	Matière organique, tourbe	H	M
R+	calcaire, dolomie	VH	VH
R	Roches ignées et métamorphiques	L	L

Le territoire est alors classé en quatre classes : VH : très vulnérable, H : vulnérable, M : moyennement vulnérable, L : faiblement vulnérable.

Cette carte nécessitait la superposition de la carte des formations superficielles classifiée selon la méthode Minnesota et celle des profondeurs à la nappe reclassées en deux catégories (inférieure ou supérieure à 6 pieds). Elle a été réalisée sous IDRISI afin de pouvoir réaliser la superposition.

B - Carte de niveau 2 :

Elle nécessite soit la carte des formations superficielles, soit les données de forage qui permettent de connaître les zones de faible ou de moyenne perméabilité, la profondeur à la nappe et le type de matériau de l'aquifère. Dans notre cas la carte des formations superficielles a été utilisée pour la réalisation de la carte de niveau 1. Le choix s'est donc porté sur l'utilisation de la méthode ponctuelle. La carte de niveau 2 ainsi réalisée servira plutôt à contrôler la validité des informations déterminées par la carte de niveau 1 qu'à raffiner l'évaluation de la vulnérabilité par l'ajout d'information, comme le veut l'application de la méthode.

Deux fichiers de points ont été utilisés :

- Le fichier de points qui a servi dans la réalisation de la carte piézométrique des bassins de la Sainte-Anne et de la Jacques-Cartier. Ces points ont été contrôlés et sont fiables.
- Le fichier de points provenant de la banque de données du projet Portneuf, regroupant toutes les informations existantes sur ce territoire, provenant tant du ministère que de rapports de consultants. Dans ce fichier, les forages présents au niveau des deux bassins n'ont pas été pris en compte, de même que les forages dont la description stratigraphique ne correspond pas à la formation quaternaire présente à ce niveau.

Trois paramètres entrent en ligne de compte dans la réalisation de ce niveau. Le premier, concernant la composition du matériel au niveau de la nappe, est basé sur le Tableau 23. La terminologie utilisée pour classer les matériaux est celle des foreurs, car la majorité des descriptions de forages de la base de données proviennent de foreurs. La terminologie est simple, pour les matériaux non consolidés, l'absence du terme argile donne la classe 2, la présence d'argile dans le sable donne la classe 3, et l'argile donne la classe 4.

Tableau 23 : Classement des matériaux du niveau de la nappe par catégories (the geologic sensitivity project workgroup, 1991)

Terminologie de l'ingénierie (ASTM)	Terminologie géologique	Terminologie de forage	Catégorie de classement
<i>Matériel non consolidé</i>			
gravier argileux, gravier silteux, gravier faiblement granoclassé, gravier bien granoclassé, sable faiblement granoclassé, sable bien granoclassé	plaine d'épandage, sable et gravier glaciaire, dépôts de terrasse, matériaux organiques, tourbes, loess, silt et sable fin glaciaire	tout type de combinaison de sable et gravier qui n'inclut pas le terme d'argile	2
sable silteux, sable argileux	till sablo-loameux, till loamo-sableux, alluvion, colluvion	sable argileux, argile sableuse, bassin sédimentaire, argile graveleuse, roc et argile, toute autre description modifiée par l'argile	3
argile lourde, argile pauvre	argile glaciaire, till loameux, till argilo-loameux, till argileux	argile	4
<i>Matériel consolidé</i>			
calcaire, dolomie	calcaire karstique, calcaire, dolomie	calcaire, limerock Shakopee, prairie du chien, etc, roc	1
sable, roche ignée ou métamorphique	sable, roche ignée ou métamorphique	sable, Sandrock Jordan, St Peter, etc., roc	2
siltstone	silt, séquence interlitée ou dépôt mixtes, calcaire shaleux, shale sableux	shale modifié par le calcaire ou le sable, mudrock	3
shale	shale	shale	4

Pour le second paramètre, il s'agit d'évaluer l'épaisseur de la zone vadose, cela se fait à l'aide de l'information profondeur à la nappe. Information directe et fiable dans le cas où on utilise le

fichier contenant les points au niveau des bassins de la Sainte-Anne et de la Jacques-Cartier, mais qui nécessite l'utilisation du maillage des profondeurs à la nappe lorsque l'information est estimée pour le fichier des points de la base de données.

Le troisième paramètre, qui est l'évaluation des unités de faible perméabilité, est celui qui pose le plus de problème au niveau des classes, car en fait ces unités sont évaluées à partir du temps de passage de l'eau dans l'unité.

2.4.4 La méthode EVARISK

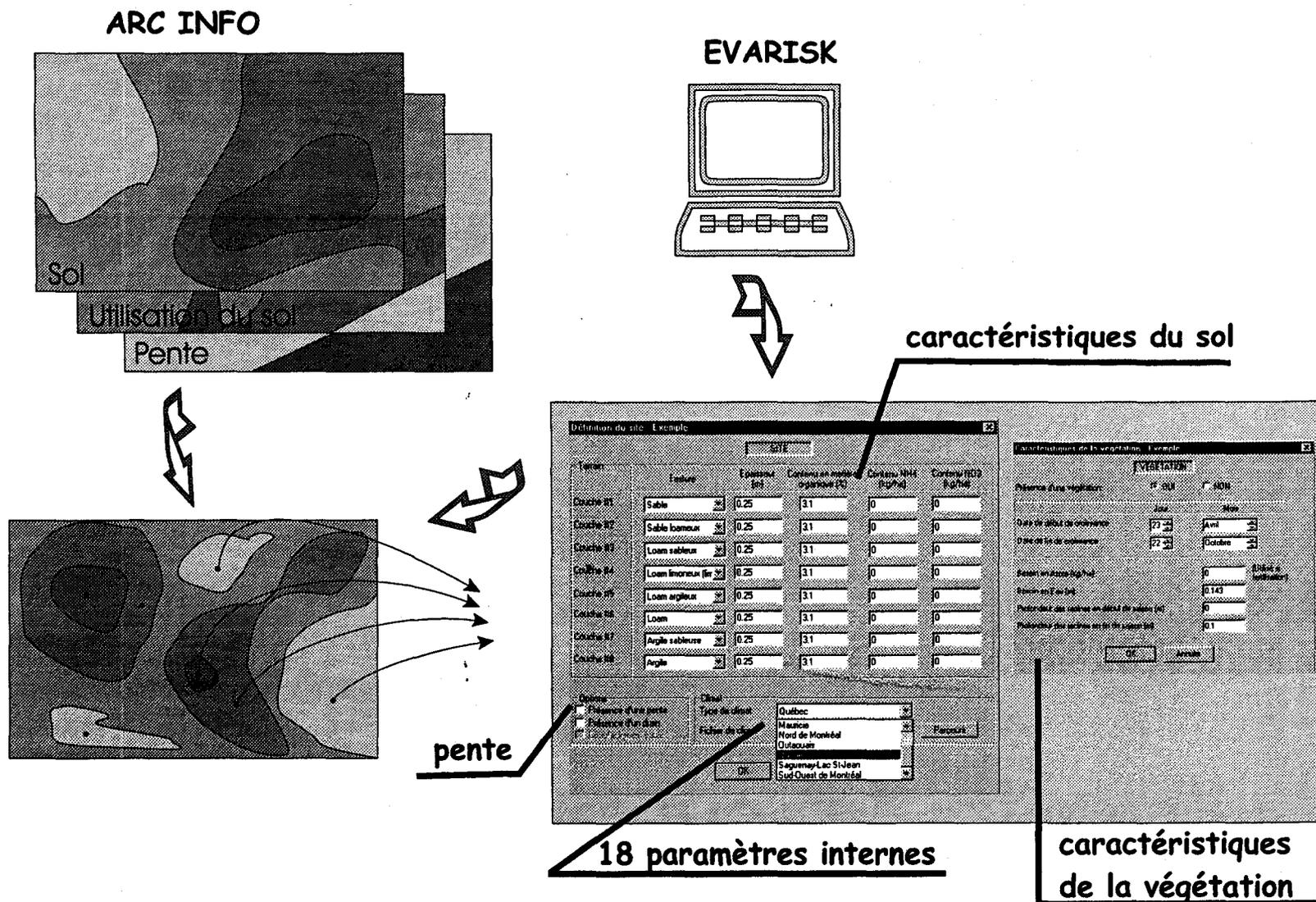
2.4.4.1 Théorie

C'est une méthode analytique, définie comme un outil d'évaluation des risques de contamination des eaux souterraines par les sources diffuses, à l'échelle régionale. Ce logiciel a été conçu en 1997 à l'INRS-Eau. Il s'agit d'un logiciel simple d'utilisation dont la plupart des informations utiles sont incorporées au logiciel via une base de données. EVARISK permet de simuler différents composés (transport de sels de déglçage, transformation et migration des hydrocarbures miscibles, des pesticides et des fertilisants azotés), dans un contexte de gestion à l'échelle régionale. Ce logiciel a été conçu pour étudier les processus d'atténuation et d'écoulement au niveau des premiers mètres sous la surface. Pour notre application, on s'intéresse uniquement au flux d'eau lessivé (migration de l'eau).

Le fondement théorique d'EVARISK s'appuie sur un modèle mécaniste et stochastique de simulation de flux d'eau et de transformation d'azote et pesticides dans la zone non saturée du sol (voir Villeneuve *et al.*, 1987 pour plus de détails concernant ce modèle). EVARISK est applicable en tant que modèle d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque parce qu'il nécessite peu de données d'entrée et parce qu'il permet la détermination de la quantité de flux d'eau lessivée. Le nombre de paramètres nécessaire pour faire fonctionner le logiciel dépend des composés à simuler. La plupart des paramètres sont incorporés au logiciel mais certains doivent être définis par l'utilisateur (Figure 11) : (1) la composition des différentes couches de sol; (2) la présence d'une pente; (3) le type de végétation avec la quantité d'eau consommée; (4) la sélection de la région d'étude afin que les valeurs moyennes des paramètres incluses par défaut au logiciel, soient représentatives.

Le résultat, obtenu ponctuellement, est une moyenne de quantité d'eau lessivée en mètre pour un an. Une forte hauteur d'eau lessivée sous-entend une faible protection de l'aquifère.

Figure 11 : La méthode EVARISK, paramètres et cotation



2.4.4.2 Limitations

EVARISK est un logiciel conçu pour étudier les processus d'atténuation et d'écoulement au niveau des premiers mètres sous la surface du sol. Il est dédié à l'étude de quatre types de polluants : les sels de déglacage, les fertilisants azotés, les pesticides, et les hydrocarbures.

Pour la présente étude il est supposé que :

- 1) la quantité de polluant est nulle;
 - 2) l'épaisseur étudiée va jusqu'à une profondeur maximale de un mètre (à moins que la nappe ne se trouve avant). Si la nappe est plus profonde, on admet qu'à partir de un mètre il ne s'agit essentiellement que de transfert d'eau;
 - 3) seul l'écoulement vertical est pris en compte;
 - 4) le résultat obtenu ponctuellement est une moyenne de la quantité d'eau lessivée exprimée en mètre par an;
 - 5) une hauteur d'eau lessivée importante sous entend une faible protection de l'aquifère;
 - 6) la valeur de flux d'eau lessivée en un point est valable sur un polygone présentant les mêmes caractéristiques paramétriques qu'au point de calcul;
 - 7) les valeurs de flux d'eau lessivée déterminent les zones de plus ou moins forte vulnérabilité. Elles sont classées en 8 intervalles, les valeurs extrêmes étant déterminées en se basant sur les résultats extrêmes qu'il est possible d'obtenir à partir des valeurs paramétriques du logiciel.
- Étant donné que dans le cadre de cette étude on ne fait intervenir aucun polluant, certains paramètres spécifiques aux contaminants, et d'autres tels que la température ou le besoin en azote ne sont pas pris en compte pour l'étude en cours (voir détails en Annexe I).

2.4.4.3 Données

Les données qui ont servi de base à l'établissement de la carte EVARISK sont :

- La **carte des sols** d'Agriculture Canada (Raymond *et al.*, 1976) numérisée par le département des sols de l'Université Laval en 1993.
- La **carte d'utilisation des sols**. Cette carte, réalisée par le département des sols de l'Université Laval permet une distinction entre zone agricole, zone urbaine et forêt. Pour le paramètre utilisation du sol, les concepteurs de la méthode ont déterminé des valeurs standards de besoin en eau, profondeur des racines et de début et fin d'émergence en fonction du type de végétation. Dans le cas de la MRC de Portneuf la végétation à l'échelle régionale a été simplifiée.

- Le maillage des pentes dérivé du DEM (ou MNT : modèle numérique de terrain) de la MRC de Portneuf.
- Le maillage de la profondeur à la nappe est nécessaire dans le cas où le niveau d'eau se situe à moins de un mètre sous la surface du sol. Ce maillage est réalisé à partir de celui du DEM et celui de la piézométrie des bassins de la rivière Sainte-Anne et de la rivière Jacques-Cartier réalisée à partir des relevés piézométriques des forages exécutés dans cette région (Fagnan, 1998).
- La base de données des puits de la région de Portneuf est utilisée dans le cas où le matériau retrouvé sous 1 mètre de sol est de l'argile ou du roc.

La carte reste valable en prenant pour acquis que l'utilisation des sols a peu changé depuis 1971 et que les processus pouvant modifier la vulnérabilité de la nappe sont actifs dans le premier mètre de sol.

2.4.4.4 Application

Le logiciel EVARISK génère des données ponctuelles. Pour chaque point de calcul, il est nécessaire de connaître trois caractéristiques; la stratigraphie du sol, l'utilisation du sol et la pente.

Il faut définir la stratigraphie du sol sur le premier mètre si la nappe est profonde. Si la nappe se trouve à moins d'un mètre de profondeur, alors les caractéristiques stratigraphiques correspondront à la profondeur de la nappe. Chaque type de sol présent dans le comté de Portneuf a été saisi dans EVARISK en prenant soin de transformer la quantité de carbone organique (CO) en quantité de matière organique (Mo) (paramètre demandé) selon la formule :

$$Mo/CO = 1.724$$

(d'après Lyman, W.J *et al.*, 1982 dans Agéos et INRS-Eau, 1997)

L'utilisation du sol peut être forestière, agricole ou urbaine. Pour les zones agricoles, il est préférable de connaître le type de culture, mais cette information n'est pas disponible. De plus, étant donné que l'on choisit, pour chaque point, de faire exécuter le logiciel sur plusieurs années afin que le contenu en matière organique se stabilise, il serait compliqué et laborieux de tenir compte de la rotation des cultures. Les concepteurs du logiciel EVARISK ont déterminé des valeurs standards de besoin en eau, de profondeur de racines et de début et fin d'émergence des

racines en fonction du type de végétation. Ces paramètres inclus dans le logiciel influencent le flux d'eau, ils sont présentés au Tableau 24.

Tableau 24 : Classification des utilisations du sol dans EVARISK (Banton (1999, communication orale))

Zone	Type de végétation pour le comté de Portneuf	Besoin en eau (mm/an)	Profondeur racines (cm)	Début d'émergence	Fin d'émergence	
Zone forestière	<i>Feuille</i>	470	100	23-avr	22-oct	
	<i>Résineux</i>	<i>sapin/épinette</i>	460	100	23-avr	22-oct
		<i>pin</i>	184	100	23-avr	22-oct
Zone agricole	<i>Mais</i>	405	75	14-mai	24-sep	
	<i>Pommes de terre</i>	200	20-30	14-jun	13-aût	
Zone urbaine	<i>Pelouse</i>	143	10	23-avr	22-oct	

Les caractéristiques de pelouse sont utilisées dans les zones résidentielles (Banton (1999, communication orale)). Pour les zones agricoles aucune information n'est disponible quant à la rotation des cultures. Étant donné que les simulations se font sur une période de 10 ans, on choisit d'évaluer le flux d'eau moyen sur 10 ans pour chaque type de culture choisie, puis une moyenne est calculée sur les flux d'eau obtenus pour l'ensemble des cultures (maïs et pommes de terre). Il faut connaître la pente. Cette information est disponible à partir du DEM de la région de Portneuf. Il existe plusieurs méthodes pour calculer la pente à partir du DEM. La commande *slope* du logiciel Arc Info permet d'identifier la valeur maximale du changement d'altitude autour de chaque point et la valeur de pente est calculée sur chaque pixel de 53 m de côté. Le classement des pentes est la suivante : sans pente, pente de 2% à 20% et pente de 20% et plus. Par simplification on considère qu'au-delà de 2%, la pente est significative et crée un ruissellement et ce, que l'on se trouve en présence de sable ou d'argile.

Les trois fichiers, stratigraphie, type d'utilisation du sol et pente sont placés dans ArcInfo pour permettre de transformer les données vectorielles (sous forme de polygone) en données matricielles (*raster*) et procéder ainsi à l'addition des couches par pixels. La combinaison des trois fichiers est réalisée grâce à la commande « *combine()* » d'ArcInfo. Ceci permet d'obtenir une carte avec des polygones ayant chacun une valeur correspondant à la combinaison des valeurs des trois fichiers. Cette carte une fois exportée et retraitée en rattachant les données de chaque fichier à chaque polygone dans MapInfo, va servir de base pour la réalisation de la carte de vulnérabilité. Il est à noter que les polygones représentant les lacs, rivières, marécages et fleuve

sont combinés de manière à diminuer le nombre de polygones, ces zones n'étant pas nécessaires pour l'étude de vulnérabilité.

Ainsi faisant suite au premier fichier MapInfo où chaque polygone (donc chaque ligne du fichier) renferme l'information concernant le type de sol, la pente et l'utilisation du sol, un second fichier est réalisé dans lequel le découpage est le même que le précédent, mais qui ne prend en compte que la zone des deux bassins versants. Pour chaque polygone, un calcul est réalisé sous ArcInfo à l'aide de la commande « *gridmean()* » qui permet pour chaque polygone de prendre en compte la valeur moyenne des pixels du maillage de niveau de la nappe contenu dans le polygone. Cette valeur permet d'estimer le niveau moyen de la nappe pour chaque polygone. Une seconde solution aurait pu être de redécouper les polygones en fonction des valeurs de niveau de nappe, mais cette information n'étant qu'une estimation de la valeur réelle, il n'est pas nécessaire de faire un nouveau découpage qui ne ferait que compliquer le traitement du fait du nombre de polygone que cela engendrerait.

Les données manquantes à cette carte concernent les valeurs de niveau de la nappe. En effet le logiciel EVARISK est conçu pour déterminer ce qui se passe dans le premier mètre de sol. Si la nappe est plus profonde que 1 m, il faut en tenir compte lors de l'exécution du logiciel. Ainsi à la carte combinée des trois fichiers on va rajouter les données disponibles de la carte des formations superficielles, les données de puits de la région de Portneuf et enfin les valeurs de niveau d'eau. Les informations concernant le niveau de la nappe sont disponibles au niveau des bassins versants de la Sainte-Anne et de la Jacques-Cartier. Pour les zones situées au nord et à l'ouest (où le roc est proche de la surface) on ne tiendra compte que de la stratigraphie du sol qui recouvre le roc (sur environ 1m), même si le niveau d'eau est plus profond qu'1 m. Dans le cas où il n'y a aucun puits présent dans les polygones délimités, c'est la carte des formations superficielles qui fournit l'information stratigraphique lorsqu'elle est nécessaire.

Une fois toutes ces données réunies, il ne reste qu'à appliquer EVARISK. Ce logiciel ne s'applique que sur des données ponctuelles, chaque polygone défini sera donc représenté par un point. Dans un premier temps 3 fichiers ont été complétés indépendamment de la carte découpée en polygone. Dans ces fichiers, une valeur de flux moyen est définie pour chaque type de sol répertorié dans la MRC de Portneuf (Tableau B1 Annexe IV) et ce pour chaque type d'utilisation du sol, avec puis sans pente. Cela donne des fichiers de type :

- chaque type de sol lorsque l'utilisation du sol est de type agricole sans pente puis avec pente (Tableau B2 Annexe IV).
- chaque type de sol lorsque l'utilisation du sol est de type forestière sans pente puis avec pente (Tableau B3 Annexe IV).
- chaque type de sol lorsque l'utilisation du sol est de type urbaine sans pente puis avec pente (Tableau B4 Annexe IV).

Un problème se pose, au sujet du type de sol, car certains polygones définis sont composés de 2 voir 3 et même quelques fois 4 types de sol différents. Les proportions de chaque type de sol étant connues, un fichier récapitulatif (Tableau B5 Annexe IV) est réalisé. Une valeur moyenne de flux pondérée pour chaque combinaison de sol mis en évidence dans la MRC y est défini. Cette valeur dépend du pourcentage de chaque type de sol entrant dans la composition des divers sols de la MRC du type d'utilisation du sol et de la présence ou non d'une pente. Les valeurs obtenues avec ce fichier seront appliquées au premier fichier sur les polygones redécoupés.

2.5 Les tests statistiques

L'estimation de la vulnérabilité est un outil important, mais il est nécessaire de déterminer quelle est la qualité de l'information obtenue à partir des cartes de vulnérabilité. Le recours aux méthodes géostatistiques permet une analyse rigoureuse de l'information et l'utilisation à bon escient des résultats obtenus.

La mesure de l'indépendance statistique des différentes méthodes et même des paramètres entre eux, permet de mettre en évidence les différences d'évaluation de la vulnérabilité suivant le choix d'une méthode. Cela permet de déterminer dans quelles mesures le choix d'une méthode va influencer le résultat de la vulnérabilité en terme d'interprétation.

Le but de l'étude présente est de trouver une méthode qui montrerait le taux de corrélation non plus entre paramètres mais entre différentes méthodes. Il est nécessaire d'utiliser une méthode spatiale, car la corrélation se fait sur trois dimensions c'est-à-dire sur les valeurs d'une couche et entre chaque couche. Il existe plusieurs méthodes pour étudier la corrélation statistique spatiale.

2.5.1 Test de corrélation entre méthodes :

L'objectif de ce test est d'évaluer l'adéquation des résultats obtenus par chacune des 4 méthodes choisies. Une classification des méthodes sera effectuée grâce aux résultats de ce test. La méthode DRASTIC est prise comme méthode de référence dans la comparaison.

Un étude réalisée par Rosen (1994) a permis de démontrer que les paramètres de DRASTIC sont plus ou moins corrélés entre eux. Par exemple, la recharge dépend de la topographie et de la profondeur de la nappe. La corrélation des paramètres n'est pas un problème, mais oblige une estimation indépendante des paramètres (Rosen, 1994) pour garder une certaine objectivité dans l'évaluation des indices. Dans notre cas, la comparaison des méthodes en utilisant un test de corrélation directe, comme l'a réalisé Rosen, n'est pas applicable (Service de consultation statistique de l'Université Laval, communication orale) car il est possible que ces méthodes soient corrélées sans qu'un test de corrélation linéaire ne le mette en évidence.

Il existe trois autres façons de connaître la dépendance absolue entre les méthodes :

- (1) l'analyse de fréquence effectuée grâce au test de Kappa,
- (2) la comparaison de polygones de même niveau et
- (3) la comparaison de surfaces.

Les outils informatiques à notre disposition étant plus adaptés pour la réalisation de comparaison de surface et de calcul de fréquence, la comparaison de polygone ne sera pas effectuée.

2.5.1.1 *L'analyse de surface*

L'outil utilisé pour réaliser des comparaisons de cartes est IDRISI. C'est un logiciel à système matriciel (cf. section 2.2.3) qui permet de réaliser des opérations d'addition et de soustraction sur les cartes.

Les méthodes de vulnérabilité choisies pour cette étude n'utilisent pas la même échelle de classification de la vulnérabilité. Il a donc fallu dans un premier temps ramener les échelles à une échelle commune aux 4 méthodes. Les méthodes DRASTIC et EVARISK sont cotées à l'aide d'une échelle de 8 indices, GOD à l'aide d'une échelle de 5 indices et la méthode du Minnesota à

l'aide d'une échelle de 4 indices. Il est plus sécuritaire de ramener le nombre d'indice à celui proposé par la méthode Minnesota qui propose le moins de classes. Les indices de la carte DRASTIC et ceux de la carte EVARISK sont regroupés deux à deux. La carte GOD comporte 5 valeurs d'indice. La classe vulnérabilité négligeable présentant le moins d'intérêt puisque de faible vulnérabilité et étant peu représentée sur la carte, on a choisi de regrouper cette classe avec celle de faible vulnérabilité.

La deuxième étape de comparaison de surface a été de calculer les variations d'indice obtenues par chacune des méthodes par rapport aux autres. Les cartes réalisées pour la mise en évidence de ces variations sont des cartes de tabulation croisée (outil CROSSTAB d'IDRISI).

Pour la réalisation de ces cartes, nous nous sommes surtout penchés sur la comparaison de DRASTIC par rapport au trois autres méthodes (GOD, Minnesota et EVARISK) puisque DRASTIC est prise comme référence. Mais la comparaison de GOD avec Minnesota a également été effectuée.

L'analyse de surface permet de voir dans quelle mesure les cartes diffèrent les unes des autres et surtout les zones où les indices diffèrent et de combien ils diffèrent. Une fois cette étape complétée il est facile de calculer la surface de chaque variation d'indice d'une méthode à l'autre et ainsi de déterminer la fréquence d'accord ou de désaccord observée c'est ce que va permettre l'analyse de fréquence et le test de conformité.

2.5.1.2 L'analyse de fréquence et test de conformité

2.5.1.2.1 Théorie

Le logiciel IDRISI permet, grâce à l'outil « *Both cross-classification and tabulation* », d'obtenir en plus de l'image des variations d'indices entre deux cartes, d'obtenir les proportions de surface qui diffèrent entre deux méthodes de 0, 1, 2 ou 3 indices. Des graphiques seront établis pour chacune des comparaisons de manière à mettre en évidence les proportions de surfaces communes et différentes aux méthodes prises deux à deux. Les fréquences de chaque variation et les valeurs du coefficient de Kappa sont également disponibles, mais le calcul du coefficient est réalisé sur toute la surface de la carte. La valeur obtenue prend en compte les surfaces qui ne contiennent aucune valeur de vulnérabilité (les zones d'aquifères confinées et les zones de contour de cartes),

les fréquences sont donc recalculées sans tenir compte de ces surfaces et le test de Kappa est recalculé à partir des nouveaux résultats.

Le coefficient de Kappa, développé par Cohen en 1960 (Bernard, 1993), peut être interprété comme la proportion d'accord entre les observateurs, attribuable à la reproductibilité des classifications plutôt qu'au hasard. La reproductibilité est définie par le Bureau de Normalisation du Québec comme l'écart de l'accord entre les résultats obtenus avec la même méthode sur une matière identique soumise à l'essai, mais dans des conditions différentes (Bernard, 1993).

Dans le cas présent, la matière est le territoire d'étude (la MRC de Portneuf), la méthode correspond à l'évaluation de la vulnérabilité et les conditions aux différentes méthodes d'évaluation.

La mesure d'accord ou de conformité dans le cas d'une classification de n sujets (correspondant au nombre de pixels sur le territoire d'étude) en L catégories nominales (correspondant aux indices de vulnérabilité) effectuée par deux observateurs indépendants (les méthodes) permet de déterminer l'accord et l'association des classifications effectuées par les deux observateurs (ici deux méthodes). Le test peut se résumer de la manière décrite dans le Tableau 25. Pour l'étude présente, les références M_x et M_y sont tour à tour les méthodes DRASTIC, GOD, Minnesota et EVARISK. Les catégories (C_i) sont les indices de vulnérabilité et leur nombre (L) a été ramené à 4 pour chaque méthode (soit C_1, C_2, C_3 dans le Tableau 25). On choisit d'utiliser les fréquences de surface comme étant le nombre d'éléments évalué (n), la somme des éléments (X_i et Y_i) est donc représenté par une somme de fréquences. H_o représente la probabilité que les deux méthodes soient en accord en ce qui concerne l'assignation des valeurs d'indice. H_c représente la même probabilité mais dans le cas où il n'y a pas d'association entre les indices. Le coefficient de Kappa, calculé à partir de H_o et H_c représente la probabilité que les deux méthodes soient en accord sans que cela soit dû au hasard.

Tableau 25 : Schématisation du test de Kappa (modifié de Bernard, 1993)

My \ Mx	C1	C2	C3	Total	
C1	0	20	0	20	Y1
C2	0	0	20	20	Y2
C3	20	0	0	20	Y3
Total	20	20	20	60	
	X1	X2	X3		

Association parfaite
sans accord

My \ Mx	C1	C2	C3	Total	
C1	10	0	0	10	Y1
C2	0	20	0	20	Y2
C3	0	0	30	30	Y3
Total	10	20	30	60	
	X1	X2	X3		

Association et accord
parfaits

C_i représente les catégories ou classifications possibles

X_i représente la somme des éléments classés dans la catégorie i par l'observateur M_x

Y_i représente la somme des éléments classés dans la catégorie i par l'observateur M_y

L représente le nombre de catégories total

n représente le nombre d'éléments évalués

Probabilité que les observateurs soient en accord :	$H_o = C_{11} + C_{22} + C_{33}$
Probabilité que les observateurs soient en accord sous l'hypothèse de non association entre leurs classifications :	$H_c = \sum_i X_i \cdot Y_i$
Proportion d'accord entre les observateurs attribuable à la reproductibilité des classifications plutôt qu'au hasard. Coefficient de Kappa:	$K = \frac{H_o - H_c}{1 - H_c}$

L'interprétation des résultats donnés par le coefficient de Kappa peut être réalisée grâce à l'échelle d'interprétation de Kappa mise au point par Landis et Roch en 1977 (Bernard, 1993) qui détermine quel est le taux d'accord en fonction de la valeur observée de Kappa (Tableau 26).

Tableau 26 : Échelle d'interprétation de Kappa (Bernard, 1993)

Valeur observée de Kappa	Interprétation
< 0.00	Accord quasi-inexistant
0.00 – 0.20	Faible accord
0.21 – 0.40	Accord passable
0.41 – 0.60	Accord modéré
0.61 – 0.80	Accord important
0.81 – 1.00	Accord presque parfait

Lors de l'interprétation des résultats, nous nous intéresserons aussi bien à la valeur H_o qui est la proportion d'accord observée qu'à la valeur du coefficient de Kappa finale (K). Les matrices de fréquences permettront de compléter les interprétations effectuées à partir des graphiques d'analyse de surface.

2.5.1.2.2 Remarques et limitations

L'utilisation du test de Kappa sous-entend 3 hypothèses :

- 1) les individus à classer doivent constituer un échantillon représentatif de la population cible pour l'instrument de mesure à l'étude et doivent contribuer de façon unique à l'échantillon, c'est-à-dire qu'un individu ne doit pas être évalué plus d'une fois par chaque observateur.
- 2) les catégories doivent être nominales, indépendantes, mutuellement exclusives et exhaustives.
- 3) les observateurs doivent opérer de façon indépendante.

Remarque : Pour la corrélation entre les méthodes, sachant que le but recherché est le degré d'accord des cartes (la similitude des cartes), le fait que le nombre d'indices varie d'une méthode à l'autre pose un problème. Cela explique qu'il a été nécessaire de traiter l'information relative à chaque carte de manière globale (en reclassifiant les cartes selon un maximum de 4 indices) avant d'effectuer la comparaison par méthode. Étant donné que c'est la variation relative des indices sur un carte qui importe pour la comparaison, cette opération ne pose pas de problème.

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Chaque carte de vulnérabilité et sa légende sont inclus sur une même planche en annexe VII.

Dans cette section les résultats relatifs à chacune des méthodes appliquées sont présentés. Ces résultats se réfèrent à la répartition de l'indice de vulnérabilité et aux particularités des méthodes en terme d'évaluation de vulnérabilité. La partie discussion permet de mettre en relation les différentes évaluations obtenues par chaque méthode et de mettre en évidence la nécessité d'une analyse statistique.

3.1 La méthode DRASTIC

Les cartes des paramètres réalisées à partir de la méthode DRASTIC pour la MRC de Portneuf montrent une certaine homogénéisation. Si on prend l'exemple de la carte des profondeurs à la nappe (Fagnan, 1998), la majeure partie de la région d'étude est caractérisée par des valeurs allant de 1.5 à 4.5 m et donc représenté par un indice identique. Les valeurs de profondeur à la nappe de 0 à 4.5 m sont des valeurs typiques pour le Québec (Fagnan, 1998), ce qui n'est pas le cas pour les régions où la méthode a été élaborée. Les zones où la profondeur à la nappe est plus importante (4.5 à 15 m) sont situées dans les sables et graviers deltaïques et fluvioglaciers des municipalités de Sainte-Christine, Saint-Raymond et Pont-Rouge.

Le problème de la carte DRASTIC vient de l'homogénéité obtenue au niveau des cartes intermédiaires (cartes réalisées pour chacun des 7 paramètres). En effet, on remarque une homogénéisation dans le découpage des zones : pour les cartes type d'aquifère, type de sol, zone vadose et conductivité hydraulique, le manque de différenciation se situe au niveau des bassins des rivières de la Sainte-Anne et de la Jacques-Cartier (sables et graviers deltaïques, fluvioglaciers et littoraux).

Les cartes de vulnérabilité réalisées dans le cadre de ce projet de maîtrise prennent comme base de comparaison la carte DRASTIC. Les démarches d'établissement de chaque paramètre, faite lors de la réalisation de cette carte, devront être respectées pour la réalisation des autres cartes afin de permettre une comparaison objective des méthodes. Ainsi si on prend le cas du paramètre recharge, la méthode choisie pour DRASTIC est celle découlant de l'estimation du coefficient de ruissellement par la méthode modifiée du Service de Conservation des Sols (SCS modifié) (Monfet, 1979). c'est ainsi que serait estimée la recharge pour les autres méthodes choisies.

Les cartes relatives à chaque paramètre ont été réalisées sous Mapinfo. L'intégration de ces 7 paramètres en une carte de vulnérabilité a été réalisé sous IDRISI, ce logiciel permettant d'effectuer des traitements mathématiques essentiels à la compilation des résultats de chaque couche de données.

Le résultat de la carte montre la vulnérabilité des aquifères libres et semi-captifs. La vulnérabilité des aquifères confinés (zones hachurées) qui correspondent aux zones où les silts et argiles affleurent, n'a pas été évaluée (Annexe VII).

Les valeurs extrêmes de vulnérabilité pour la région de Portneuf vont de 101 (roches du paléozoïque, unité des rampes rocheuses) à 193 (sables et graviers fluvioglaciacaires, unité de sables et graviers). La reclassification en 8 catégories (proposée par le guide de la méthode DRASTIC) fait ressortir les unités hydrogéologiques de sables et graviers deltaïques, fluvioglaciacaires et littoraux comme présentant les valeurs de vulnérabilité les plus élevées de la carte. Cela correspond à la troisième voir la deuxième classe de la méthode. Géographiquement parlant, il s'agit des bassins des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier. On remarque d'ailleurs que les zones où la profondeur à la nappe est plus importante (4.5 à 15 m) sont situées dans les sables et graviers deltaïques et fluvioglaciacaires des municipalités de Sainte-Christine, Saint-Raymond et Pont-Rouge. De même que pour les cartes du type d'aquifère, du type de sol, de la zone vadose et de la conductivité hydraulique les bassins des rivières de la Sainte-Anne et de la Jacques-Cartier (sables et graviers deltaïques, fluvioglaciacaires et littoraux) se distinguent du reste de la carte.

Les unités hydrogéologiques situées dans le roc (roches du précambrien et du paléozoïque) présentent les valeurs de vulnérabilité les moins élevées, correspondant à la sixième classe. Les deux deltas sont caractérisés par des indices de vulnérabilité élevés, mais on remarque que les zones de sable et gravier de profondeur importante, donc de fort potentiel aquifère, mises en

évidences sur la carte des profondeurs à la nappe dans les secteurs de Sainte-Christine, Saint-Raymond et Pont-Rouge se retrouvent sur la carte finale avec un indice de vulnérabilité moins élevé. De manière générale, on note donc une variation d'indice de 3 classes entre les zones de plus fortes et de plus faibles vulnérabilité.

Le désavantage de la méthode DRASTIC vient du fait que les intervalles de chaque paramètre ont été réalisés en se basant sur les conditions préexistantes aux États-Unis. Si on prend l'exemple de la carte des profondeurs à la nappe, la majeure partie de la région d'étude est caractérisée par des valeurs allant de 1.5 à 4.5 m et donc représenté par un indice identique. Les valeurs de profondeur à la nappe de 0 à 4.5 m sont des valeurs typiques pour le Québec (Fagnan, 1998), ce qui n'est pas le cas pour les régions où la méthode a été élaborée.

3.2 La méthode GOD

Le résultat de la carte montre la vulnérabilité des aquifères libres, semi-captifs et captifs (Annexe VII). La classification en 5 catégories fait ressortir les unités hydrogéologiques de sables et graviers deltaïques, fluvio-glaciaires et littoraux et de roches précambriennes qui présentent les valeurs de vulnérabilité les plus élevées de la carte (deuxièmes valeurs d'indice). Les valeurs extrêmes de vulnérabilité étant celles des roches sédimentaires paléozoïques et des alluvions des terrasses fluviales. Les valeurs de plus faibles vulnérabilité se situent dans les unités hydrogéologiques des sédiments fins d'eau profonde (zones d'aquifères confinés) et sables et graviers littoraux. Si on fait abstraction des zones confinées (ces zones n'ayant pas été évaluées par la méthode DRASTIC), on remarque une variation d'indice de deux classes des zones de plus forte vulnérabilité aux zones de plus faible vulnérabilité. Il y a également une différence importante d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères dans les roches précambriennes par rapport à la méthode DRASTIC. Cela vient sans doute du fait que la méthode GOD ne prend pas en compte la présence d'une pente. Dans GOD, puisque le ruissellement n'est pas pris en compte la quantité d'eau arrivant à la nappe sera plus importante. Cela peut engendrer une surévaluation de l'indice de vulnérabilité.

À la différence des autres méthodes appliquées, la méthode GOD permet l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères confinés sur la même carte que les aquifères libres. Toutefois, c'est le cas si l'aquifère confiné est le premier aquifère rencontré. Ces aquifères confinés ont été définis

comme étant les moins vulnérables à la pollution et avec l'indice le moins élevé permis par la méthode ce qui paraît normal bien que ce ne soit pas le cas pour la méthode du Minnesota.

3.3 La méthode développée par le département des ressources naturelles du Minnesota

Les résultats obtenus se retrouvent sous forme d'une carte de vulnérabilité sur laquelle est superposée un ensemble de points pouvant être de 4 couleurs différentes. Chaque couleur correspond au degré d'adéquation de l'indice de vulnérabilité du point par rapport à celui de la carte.

La carte (Annexe VII) montre la vulnérabilité de la zone vadose à la pollution. Ce qui représente de manière indirecte la vulnérabilité des aquifères à la pollution. Comme pour la méthode DRASTIC, l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères confinés à la pollution, si elle avait été évaluée, elle aurait été présentée sur une carte séparée (le niveau 3). Pourtant la carte de niveau 1 en permettant l'évaluation de la vulnérabilité de la zone vadose, détermine, comme pour la carte GOD, la vulnérabilité des aquifères confinés à condition qu'il s'agisse du premier aquifère rencontré verticalement. Les aquifères confinés sont mis en évidence (comme pour les méthodes GOD et DRASTIC) grâce à la classification des formations superficielles (Tableau 21). Ils sont évalués comme présentant une vulnérabilité des moins importante pour le territoire de la MRC, mais ne sont pas définis par l'indice minimum permis par la méthode (indice de 3 sur 4).

La classification en quatre catégories fait ressortir les unités hydrogéologiques de sables et graviers deltaïques et sables et graviers fluvioglaciaires comme présentant les valeurs de vulnérabilité les plus élevées de la carte ce qui correspond à la première classe de la méthode. Géographiquement parlant, il s'agit des bassins des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier. Les unités hydrogéologiques constituées de till et de sédiments fins d'eau profonde présentent les valeurs de vulnérabilité les moins élevées, correspondant à la quatrième et dernière classe. Les unités hydrogéologiques constituées de roches précambriennes sont considérées comme étant très vulnérable (deuxième classe), ce qui se rapproche des résultats obtenus avec la méthode GOD (voir point suivant).

La carte de niveau 2 (superposée à la carte de niveau 1 dans le cas de cette étude) permet d'affiner les résultats obtenus avec la carte de niveau 1 dans les zones où les informations sont abondantes.

La densité de points présents sur la carte, une fois les données ponctuelles traitées, est telle que la carte visualisée au 1/100 000^{ième} ou même 1/200 000^{ième} ne donne rien d'utilisable à cette échelle. Ainsi une étude statistique a été réalisée sur ces points, afin de savoir dans quel proportion la carte de niveau 1 correspond aux résultats donnés par la carte de niveau 2, les résultats obtenus sont ceux des Tableaux 27, 28 et 29. Les informations ponctuelles données par ces points de forage se trouvent dans deux fichiers différents, le calcul de la densité de points a donc d'abord été opéré sur chaque fichier (Tableaux 27 et 28). Les deux fichiers permettant une séparation des zones granulaires des autres zones, il semblait intéressant d'analyser l'information obtenue par chaque fichier. Les informations ont ensuite été regroupées dans un fichier (Tableau 29).

Tableau 27 : Différence d'indice entre le niveau 1 et 2 de la méthode Minnesota dans la zone des deux bassins.

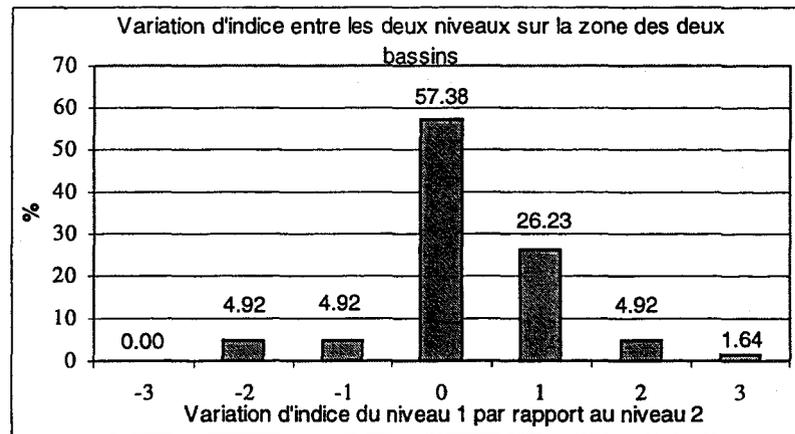


Tableau 28 : Différence d'indice entre le niveau 1 et 2 de la méthode Minnesota en dehors des zones des deux bassins.

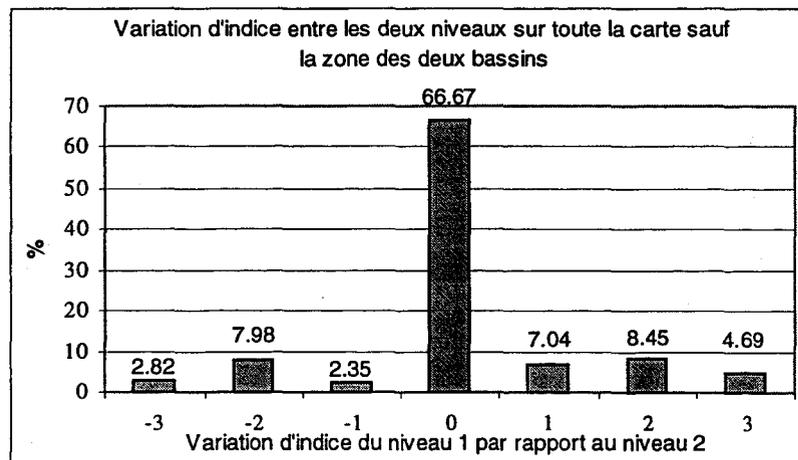
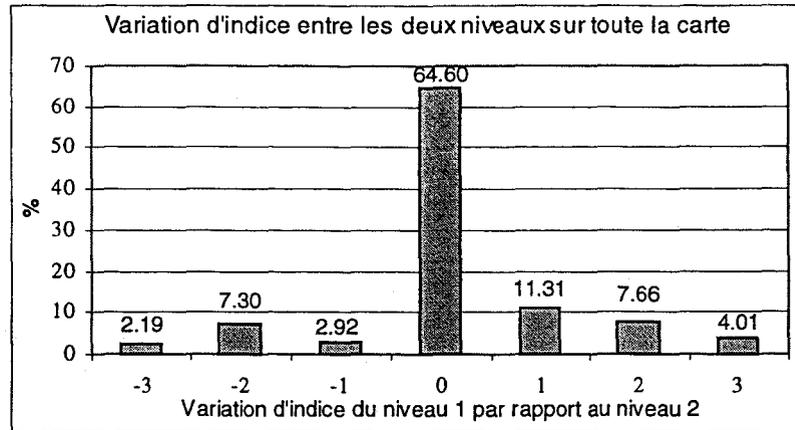


Tableau 29 : Différence d'indice entre le niveau 1 et 2 de la méthode Minnesota sur toute la carte.



Globalement (Tableau 29) on peut en déduire que la majorité des points (plus de 60%) ne présente aucune variation avec le niveau 1. Les résultats obtenus avec la carte de niveau 2 viennent dans l'ensemble confirmer ceux obtenus par la carte de niveau 1, ce qui est une assurance au niveau de la rigueur de l'application de la méthode. On remarque une adéquation un peu moins bonne au niveau de la zone des deux bassins (correspondant aux données piézométriques). Cela vient probablement du fait que dans les zones telles que les zones de sables et graviers fluvioglaciaires, le matériau est hétérogène. Or, les valeurs obtenues ponctuellement peuvent différer de celles obtenues lors de la réalisation de cartes régionales qui demandent une synthèse et une simplification des informations. Le fait de regrouper les informations de la zone des deux bassins avec celles du reste du territoire ne pose donc pas de problème pour la réalisation de la carte.

En regardant l'ensemble des variations (pourcentage de points autre que 0), on se rend compte que dans la majorité des cas, la carte de niveau 1 donne des indices de vulnérabilité plus forts, on le remarque surtout sur les données relatives aux données piézométriques dans les zones des deux bassins (la Sainte-Anne et la Jacques-Cartier) (Annexe V). Cela est logique puisque c'est une carte de première approche, donc elle se doit d'être plus sécuritaire.

3.4 La méthode EVARISK

L'application d'EVARISK à chacun des polygones permet d'obtenir des valeurs de flux d'eau lessivée (quantité d'eau infiltrée). Il s'agit de la moyenne décennale (en mètre) des moyennes

annuelles de hauteur d'eau infiltrée en un point. Dans le cadre de cette étude, cette valeur est apparentée à la vulnérabilité de l'eau souterraine ponctuellement.

Afin de pouvoir comparer les cartes de vulnérabilité, les valeurs de flux ont été regroupées en 8 classes comme pour DRASTIC. Les valeurs de flux sont supposées continues et linéaires et les classes sont découpées à partir d'intervalles égaux.

La valeur minimale de flux est la plus petite valeur que l'on puisse obtenir par le logiciel et correspond à la présence d'argile (soit 0 m d'eau). La valeur maximale est la plus grande valeur que l'on puisse obtenir et correspond à la présence d'un mètre de sable (soit 0.6789 m d'eau). Ces valeurs sont fonction des conditions extrêmes proposées par la méthode et non pas des valeurs extrêmes obtenues pour la MRC de Portneuf.

Les polygones sont recombinaés en fonction des intervalles créés à partir des valeurs obtenues.

La carte (Annexe VII) montre la vulnérabilité des aquifères libres, semi-captifs et captifs ou plutôt estime le degré de protection que procure le premier mètre de sol pour ces aquifères. La distinction des zones de sables et graviers deltaïques des deux bassins de la Sainte-Anne et de la Jacques-Cartier est très peu marquée. Plus de 60% de la carte se retrouve dans la troisième classe de vulnérabilité ce qui reflète une estimation assez homogène de la vulnérabilité. La variabilité de protection des aquifères est difficile à percevoir. La carte montre un découpage important avec des variations importante d'indices de vulnérabilité d'une zone à l'autre, ce qui est dû au type de sol et à l'utilisation du sol.

Les zones d'aquifères confinés comme les zones d'aquifères granulaires ne sont pas distinguables du reste de la carte. Cela vient du fait qu'EVARISK évalue la vulnérabilité sur le premier mètre de sol et considère l'utilisation du sol comme un paramètre aussi important que les autres. De plus ce qui est évalué c'est la capacité d'un sol à protéger la ressource, à atténuer la contamination, la protection que procure une couche d'argile ou de silt au-dessus de l'aquifère n'est pas considéré comme un élément plus important que les autres éléments. Les zones qui correspondent aux zones d'aquifères confinés sont définies par des indices de vulnérabilité moyens ou forts, ce qui ne correspond pas à la vulnérabilité d'aquifères profonds protégés par des matériaux fins.

Certaines zones composées de roc affleurant n'ont pu être évaluées à l'aide de cette méthode. Le roc n'est pas une formation pédologique et ne peut donc pas être pris en compte. Ces zones

constituent les régions où se fait la recharge des aquifères rocheux, les impacts d'une éventuelle contamination sont donc plus importants qu'ailleurs. Le fait de ne pouvoir les évaluer constitue un handicap pour cette méthode.

Le principal problème de la carte ainsi obtenue provient de la variabilité de la valeur de flux. En effet, du fait de l'approche stochastique utilisée, les valeurs de flux varient et certains polygones peuvent ne pas se retrouver dans la même classe selon les simulations. Chacun des paramètres ayant un écart type de 10% de sa valeur.

Lors de la réalisation de la carte de vulnérabilité un fait important a été noté : l'utilisation du sol est un facteur qui influence autant le résultat final que les autres paramètres. L'importance d'un tel paramètre peut paraître étonnante mais provient du fait qu'EVARISK évalue la quantité d'eau lessivée dans le premier mètre de sol. L'utilisation du sol (type de végétation, type de culture) aura donc un effet important pour ce bilan hydrologique. Il s'avère que, dans notre cas, c'est le paramètre pour lequel le moins de données sont disponibles donc celui qui comporte les estimations les moins fiables.

3.5 Discussion

Bien que les quatre cartes de vulnérabilité obtenues ne soient pas identiques, les zones de fortes vulnérabilité que sont les unités hydrogéologiques de sables et graviers deltaïques, fluvio-glaciaires et littoraux ressortent pour chacune des méthodes (bien que discrètement pour la méthode EVARISK). Les zones de roc sont plus difficilement interprétables. En effet, les données y sont moins fréquentes et les paramètres tels que la recharge et la topographie influencent particulièrement l'évaluation de leur vulnérabilité.

Les zones d'aquifères confinés ne sont pas évaluées par toutes les méthodes. La méthode GOD et indirectement la méthode Minnesota évaluent ces zones comme zone de moindre vulnérabilité par rapport à l'ensemble du territoire. Toutefois, la méthode du Minnesota évalue ces zones comme plus vulnérables que la méthode GOD. Cela vient de la simplification de la méthode du Minnesota qui définit un aquifère confiné d'une vulnérabilité moyenne ou faible selon que la nappe est supérieure à 1,83m ou inférieure à 1,83m.

À l'inverse des autres cartes, pour la méthode EVARISK, les zones d'aquifères confinés ne sont pas évidentes sur la carte et correspondent dans l'ensemble plus à des zones d'indices de vulnérabilité moyens à forts.

Ce qui ressort lorsque l'on compare la carte EVARISK avec les autres cartes, c'est l'absence de délimitation des unités hydrogéologiques de sables et graviers et l'absence de délimitation des unités confinées. En fait, EVARISK utilise l'information du type de sol sur le premier mètre, mais n'utilise pas les informations relatives à la carte des formations superficielles. Donc d'après les résultats obtenus, on peut penser qu'EVARISK évalue la vulnérabilité du sol à la pollution. L'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution par cette méthode pourrait donc être faussé. Cela va être vérifié lors de la comparaison des résultats avec les autres cartes.

Une des difficultés de l'évaluation de la vulnérabilité réside dans la quantité d'information nécessaire à une bonne évaluation. Chaque paramètre doit être évalué sur l'ensemble du territoire, ce qui nécessite une quantité d'informations d'autant plus importante qu'il y a de paramètres. Il est alors difficile d'établir un compromis entre la quantité d'informations minimum nécessaire et le coût engendré par l'acquisition de ces informations. La quantité d'information nécessaire à l'évaluation d'une carte de vulnérabilité est régie par :

(1) le nombre de paramètres et les données nécessaires à l'évaluation de ces paramètres. Plus le nombre de paramètres est important plus la connaissance du milieu est complète et moins il y aura de variabilité dans l'indice final de vulnérabilité dû à l'importance relative décroissante de chaque paramètre. D'un autre côté, en augmentant le nombre de paramètres le coût d'acquisition des données est plus élevé et les paramètres les plus importants dans l'évaluation de la vulnérabilité sont plus difficile à mettre en évidence.

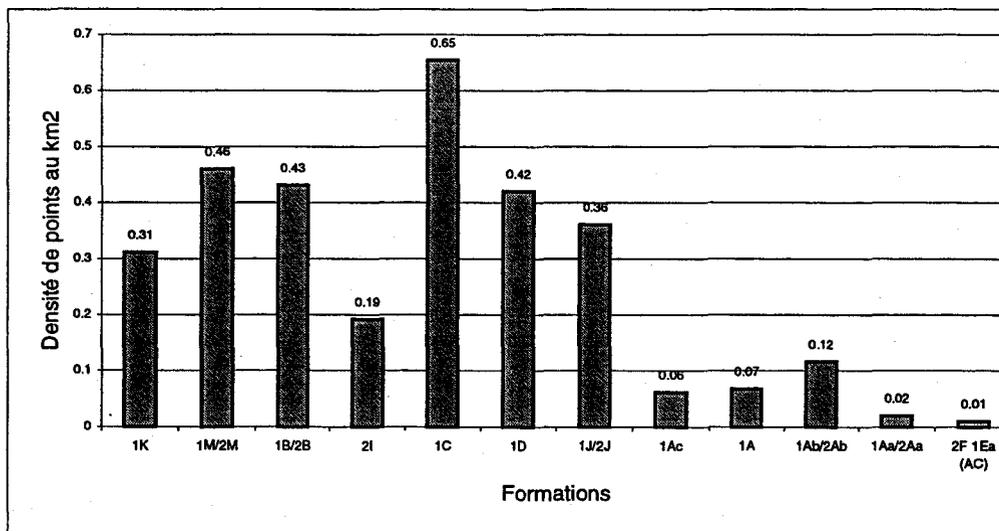
(2) la densité d'information nécessaire à l'évaluation de chaque paramètre ou donnée. Afin d'avoir une idée de la quantité moyenne de points par km² nécessaire à une étude de vulnérabilité régionale, un calcul de densité de points a été effectué à partir de la quantité de points utilisée pour réaliser la carte de niveau 2 de la méthode Minnesota. La carte de niveau 2 de la méthode Minnesota a été réalisée de manière ponctuelle et les deux niveaux présentent une bonne adéquation, la quantité de points utilisée pour la réalisation du niveau 2 semble donc suffisante dans notre cas pour l'ensemble du territoire.

La carte qui sert de base pour le comptage des points par km² est la carte des unités hydrogéologiques puisque c'est la vulnérabilité de ces unités que l'on cherche à évaluer. Un

recensement du nombre de forage présents dans chacune des unités est effectué. Connaissant la surface de chaque unité, la densité de point par unité peut être déterminée (Tableau 30) :

Tableau 30 : Densité de point au Km² pour chaque formation superficielle.

Dénomination des formations	Formation	Surface (Km2)	Densité de points au Km2
Sables des hautes-terrasses sur sables et graviers deltaïques	1K	93.1600	0.3112924
Sables littoraux	1M/2M	145.5950	0.460180638
Sables et graviers deltaïques	1B/2B	188.1660	0.430470967
Sables et graviers fluvioglaciers	2I	73.1065	0.19150144
Alluvions des plaines d'inondation	1C	9.1700	0.654307525
Sables des hautes-terrasses	1D	38.1000	0.419947507
Moraine de Saint-Narcisse	1J/2J	47.1000	0.360934183
Rampes rocheuses de la Plateforme du Paléozoïque	1Ac	113.9500	0.061430452
Till sur roches sédimentaires	1A	149.4000	0.066934404
Till en couverture continue sur roches ignées/métamorphiques	1Ab/2Ab	86.0200	0.116252034
Till sur roches ignées/métamorphiques	1Aa/2Aa	814.8598	0.01963528
Aquifères confinés. Roches sédimentaires et ignées recouvertes par argiles marines.	2F 1Ea (AC)	200.9700	0.009951734



La densité des informations varie de 1 par 2 Km² jusqu'à 1 par 10 Km² selon le type de formation géologique en présence.

Aux vues du graphique ci-dessus, on peut dire que :

- la quantité d'information dans les zones de roc est largement insuffisante : 1 par 10 Km².
- les zones de sables et graviers sont bien représentées avec une densité de points qui est de 2 à 6 points par 10 Km².

- la quantité d'information est plus importante dans les zones plus habitées.
- Dans les sables et graviers deltaïques qui présentent des formations plus homogènes l'information est deux fois plus importante que dans les sables et graviers fluvioglaciers.

D'après l'EPA (1993) l'exactitude et la distribution spatiale des informations varient en fonction des facteurs considérés. De plus, la validité de la classification de la vulnérabilité varie spatialement en fonction de la quantité d'information disponible. C'est ce que l'on peut voir par le calcul effectué ci-dessus. En effet, si les zones sableuses sont bien représentées en densité de points ce n'est pas le cas des zones de roc, ce qui engendre une insécurité au niveau des résultats de vulnérabilité obtenus dans ces zones.

3.6 Conclusion

En résumé, différents points sont à soulever du fait de l'élaboration des 4 cartes de vulnérabilité et des résultats obtenus :

- (1) les cartes se ressemblent, mais une comparaison statistique s'avère nécessaire pour déterminer l'adéquation entre les méthodes;
- (2) la redondance des paramètres dans la méthode DRASTIC est bon pour la stabilité des résultats, mais peut engendrer un biais sur l'évaluation de la vulnérabilité;
- (3) GOD est une méthode à 4 paramètres qui permet d'évaluer la vulnérabilité des aquifères confinés et non-confinés. Les résultats sont intégrés sur une seule carte, ce qui est propice à la planification de l'aménagement du territoire;
- (4) la méthode du Minnesota est très facile d'application car elle ne nécessite que deux paramètres (niveau d'eau et pédologie). De plus, pour des zones d'intérêt (zones plus vulnérables, zones en développement, zones ayant plus d'informations disponibles etc.) on peut effectuer des cartes de niveau 2 qui sont plus précises;
- (5) les résultats obtenus par la méthode EVARISK diffèrent des résultats des autres méthodes. Il y a peu de distinction des unités hydrogéologiques alors que pour les trois autres cartes elle est présente, même implicitement.
- (6) l'écart de la carte EVARISK et des autres cartes peut être relié au fait qu'on utilise la carte pédologique. On peut donc expliquer le phénomène par le fait qu'on évalue la vulnérabilité du sol et non pas de la zone vadose ou que les informations données par la carte pédologique ne correspondent pas aux informations de la carte des formations superficielles;

Remarque : au sujet de la méthode EVARISK, il est important de signaler, avant de tirer des conclusions, que la méthode EVARISK sert à quantifier (en concentrations ou en charges) le lessivage de contaminants à travers la couche pédologique et cela en utilisant les informations relatives au premier mètre de sol. Toutefois, cette méthode ponctuelle est utilisable, d'après l'auteur, pour déterminer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution. En effet, d'après l'auteur, la majorité des processus d'atténuation et de dispersion s'effectuent dans le premier mètre de sol, de plus si la quantité de contaminants est placée à 0, le lessivage observé est celui de l'eau et l'un des postulats établis pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque est que le fluide utilisé comme référence est l'eau. Ainsi l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque par la méthode EVARISK est faisable et comparable à celle effectuée par les autres méthodes.

(7) une question se pose alors pour la carte du Minnesota. Le résultat aurait-il été en adéquation si au lieu d'utiliser la carte des formations superficielles on avait utilisé la carte pédologique traitée pour revenir au matériel primitif? Il aurait été bon d'effectuer cette carte en utilisant les deux méthodologies (utilisation de la carte des formations superficielles et modification de la carte pédologique pour revenir au matériel primitif comme le préconise la méthode) et ainsi de déterminer dans quelles mesures ces deux cartes diffèrent l'une de l'autre. Cela aurait pu être fait statistiquement à l'aide d'un test de conformité de Kappa. Faute de temps, cela n'a pu être réalisé.

Chaque carte de vulnérabilité et sa légende sont inclus sur une même planche en annexe VII, mais tout ce qui concerne l'explication de l'utilisation de la méthode, le compte rendu de la méthode d'évaluation employée et la référence aux types et à la quantité de données sont inclus dans le présent chapitre et le chapitre précédent. Si ces cartes étaient publiées pour la gestion du territoire, il aurait fallu ajouter sur la carte de vulnérabilité, un résumé explicatif, un compte rendu de la méthode et des précisions sur le type, la quantité et la qualité des données utilisées.

CHAPITRE 4 : COMPARAISON DES MÉTHODES

Dans ce chapitre sont comparées deux à deux les cartes de vulnérabilité obtenues par chacune des quatre méthodes. Les comparaisons sont d'ordre statistique et permettent de statuer sur l'accord d'attribution des indices de vulnérabilité sur le territoire de la zone d'étude.

4.1 Introduction

D'après Fréchette (1987) et Champagne (1990), DRASTIC permet une évaluation correcte de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination lorsque testée dans le contexte québécois. Par contre, peu d'études comparatives ont été réalisées pour valider cette méthode. Toutefois, le département de l'ingénierie agricole et biologique de l'Université Purdue a comparé trois méthodes d'évaluation de la vulnérabilité spécifique aux pesticides (DRASTIC, SEEPAGE et SISP) entre elles et par rapport aux données réelles de pollution. Les résultats indiquent que la méthode DRASTIC performe mieux que les autres et que la méthode SEEPAGE est une méthode conservatrice.

La section précédente a permis de comparer les cartes de vulnérabilité élaborées pour la même zone d'étude. Afin de compléter la comparaison, il faut effectuer des tests statistiques pour mettre en évidence les variations d'indice de vulnérabilité d'une méthode à l'autre.

Comparer les méthodes d'évaluation revient à voir si ces méthodes sont corrélées deux à deux et donc indirectement de déterminer quel est la méthode qui offre le plus de stabilité. Dans le cas présent, un simple test de corrélation ne s'applique pas car il ne permet de statuer que sur la corrélation directe ou linéaire entre les méthodes. Or les méthodes peuvent être corrélées sans pour autant donner des résultats identiques. C'est pourquoi le test d'analyse de surface et le test de Kappa ont été utilisés. Les corrélations existantes entre les méthodes peuvent être ainsi quantifiées. Mais on ne peut pas statuer sur les causes des variations d'évaluation ainsi observées statistiquement. Différents tests sur les paramètres permettraient la mise en évidence : (1) des

variations d'évaluation d'un même paramètre par différentes méthodes indépendamment du concepteur; (2) des relations entre les paramètres d'une méthode.

4.2 Comparaison des méthodes.

La première étape est la réalisation d'une carte d'analyse de surface (Annexe VIII). Cette carte permet de visualiser les variations dans l'évaluation de la vulnérabilité d'une même zone par deux méthodes.

Le Tableau 31 permet de déterminer la proportion de surface qui diffère de 3, 2 ou 1 indice d'une méthode à l'autre. Ces valeurs permettent de tracer des graphes de comparaison (Tableau 32). Cela permet de déterminer l'association que l'on a pour chaque méthode par rapport aux autres. Au bas de chaque matrice le test de Kappa, permet de tester les méthodes deux à deux. Ce test aussi appelé test de proportion d'accord permet de déterminer dans quel mesure il y a association (les méthodes identifient les mêmes variations d'indice sur l'ensemble du territoire) mais également accord entre les méthodes (les méthodes identifient l'ensemble du territoire par les mêmes indices). Ce test est effectué à partir du calcul de la fréquence des variations d'indices d'une méthode par rapport à une autre (Tableaux 31 et 32) (voir le chapitre 2 pour plus de détails sur le test).

Deux éléments sont pris en compte pour l'interprétation des résultats statistiques :

1- L'association entre les méthodes est évaluée par l'analyse de fréquence (Tableau 31). Afin de mieux comprendre les variations de fréquence, les graphiques (Tableau 33) seront utilisés. L'association indique que même si deux méthodes n'évaluent pas la vulnérabilité avec le même indice, la variation dans l'évaluation des différents indices est répartie de la même manière sur le territoire avec une surévaluation pour une des deux méthodes.

2- L'accord entre les méthodes est donné par le test de Kappa (Tableau 32). Ce test évalue le degré de conformité des cartes deux à deux. Il faut noter que l'indice pris en compte ici est l'indice de proportion d'accord H_0 qui ne tient pas compte de la part due au hasard. L'accord qui est évalué à ce niveau est la probabilité que deux méthodes évaluent la vulnérabilité avec le même indice.

Tableau 31 : Matrice de comparaison de fréquence des surfaces d'indices identiques, test de Kappa

Fréquence des surfaces DRASTIC(LIGNE)/EVARISK (COLONNE)						
X	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	Tot	
i=1	2.12901E-05	2.40914E-05	0.000561947	2.40914E-05	0.00063142	XI
i=2	0.028393152	0.017697117	0.490818083	0.048660769	0.585569121	XI
i=3	0.02973835	0.019640679	0.241616322	0.09530346	0.386298811	XI
i=4	2.24106E-06	2.07298E-05	0.026056283	0.001421394	0.027500649	XI
Tot	0.058155033	0.037382617	0.759052635	0.145409714	1	
	XI	XI	XI	XI		
Proportion d'accord observée = Ho = $\sum X_{ii} = 0.26076$						
Kappa = $(Ho-Hc) / (1-Hc) = (0.26076-0.31915) / (1-0.31915) = -0.08576$						

Fréquence des surfaces DRASTIC(LIGNE)/MINNESOTA(COLONNE)						
X	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	Tot	
i=1	7.99481E-05	1.34977E-05	0.000625049	0.000142764	0.000861259	XI
i=2	0.151512005	0.059043219	0.278360026	0.105672161	0.594587411	XI
i=3	0.027923167	0.053706944	0.048922518	0.2452366	0.375789228	XI
i=4	0.004456846	0.001787411	0.005303569	0.017214276	0.028762103	XI
Tot	0.183971966	0.114551071	0.333211162	0.368265801	1	
	XI	XI	XI	XI		
Proportion d'accord observée = Ho = $\sum X_{ii} = 0.12526$						
Kappa = $(Ho-Hc) / (1-Hc) = (0.12526-0.20407) / (1-0.20407) = -0.09903$						

Fréquence des surfaces DRASTIC(LIGNE)/GOD(COLONNE)						
X	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	Tot	
i=1	0.000216695	0.000140489	0.000610685	4.14727E-06	0.000972016	XI
i=2	0.068352669	0.154675966	0.351853129	0.021304513	0.596186277	XI
i=3	0.034899255	0.053998458	0.270794269	0.014600973	0.374292956	XI
i=4	0.000848635	0.004339597	0.022437235	0.000923285	0.028548752	XI
Tot	0.104317254	0.21315451	0.645695318	0.036832919	1	
	XI	XI	XI	XI		
Proportion d'accord observée = Ho = $\sum X_{ii} = 0.42661$						
Kappa = $(Ho-Hc) / (1-Hc) = (0.42661-0.36991) / (1-0.36991) = 0.08998$						

Fréquence des surfaces GOD(LIGNE)/MINNESOTA(COLONNE)						
X	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	Tot	
i=1	0.034158934	0.011083142	0.027161526	0.032261128	0.10466473	XI
i=2	0.14225088	0.027387467	0.025508447	0.019195126	0.21434192	XI
i=3	0.007127337	0.062889006	0.27126304	0.307008261	0.648287644	XI
i=4	0.000180023	0.012708044	0.009065843	0.010751796	0.032705706	XI
Tot	0.183717173	0.114067659	0.332998856	0.369216311	1	
	XI	XI	XI	XI		
Proportion d'accord observée = Ho = $\sum X_{ii} = 0.34356$						
Kappa = $(Ho-Hc) / (1-Hc) = (0.34356-0.27163) / (1-0.27163) = 0.09875$						

Fréquence des surfaces GOD(LIGNE)/EVARISK(COLONNE)						
X	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	Tot	
i=1	0.012904571	0.009784331	0.063629923	0.021243603	0.107562428	XI
i=2	0.016336946	0.005085021	0.175513198	0.009151142	0.206086307	XI
i=3	0.026103441	0.01996775	0.501706433	0.104745406	0.65252303	XI
i=4	0.002888368	0.002558396	0.018640617	0.009740855	0.033828235	XI
Tot	0.058233325	0.037395497	0.759490171	0.144881007	1	
	XI	XI	XI	XI		
Proportion d'accord observée = Ho = $\sum X_{ii} = 0.52944$						
Kappa = $(Ho-Hc) / (1-Hc) = (0.52944-0.51446) / (1-0.51446) = 0.03085$						

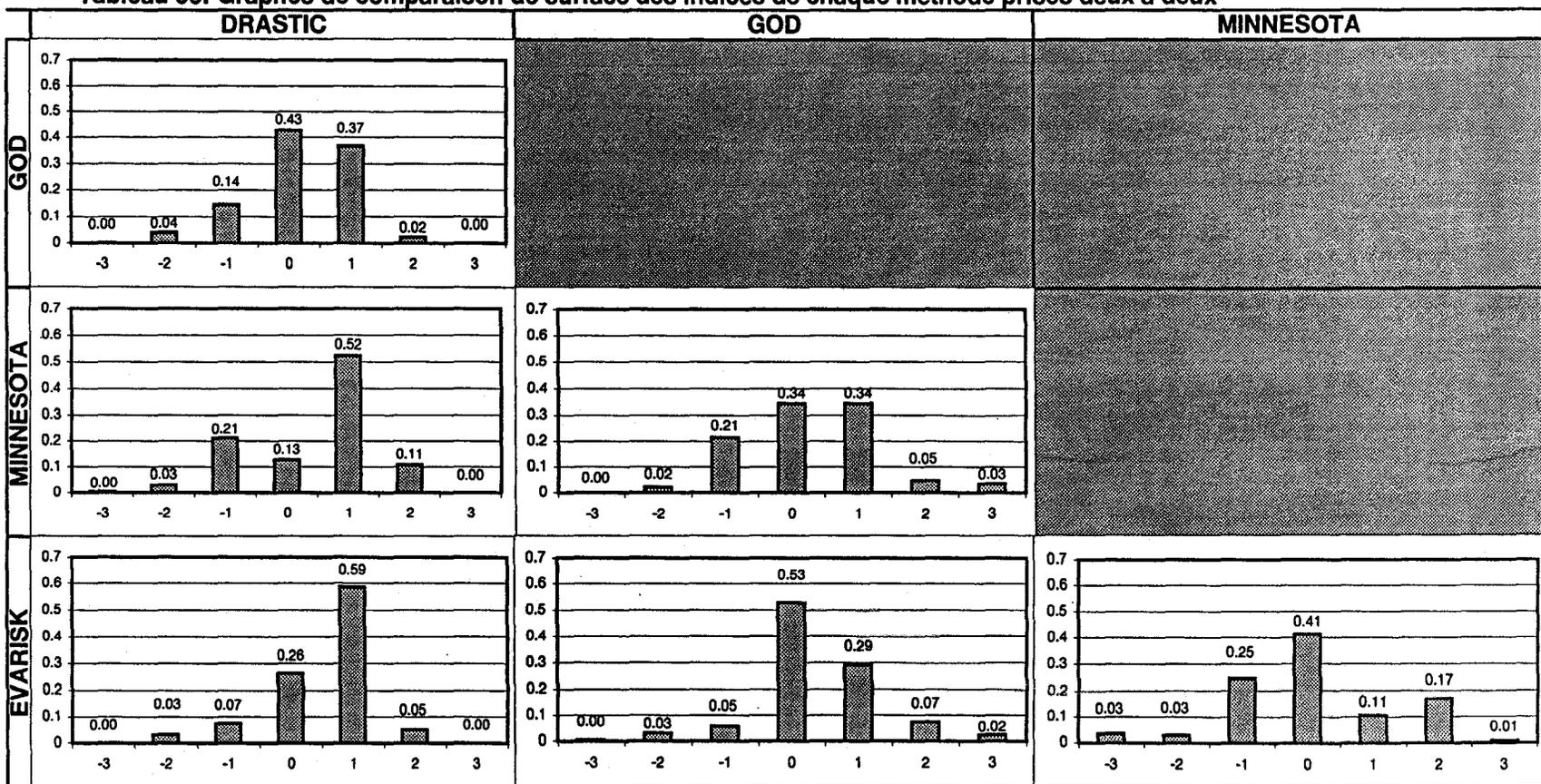
Fréquence des surfaces MINNESOTA(LIGNE)/EVARISK(COLONNE)						
X	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	Tot	
i=1	0.00272762	0.004432382	0.15869361	0.007827794	0.173681406	XI
i=2	0.011512226	0.007519018	0.084657252	0.010577429	0.114265925	XI
i=3	0.010660974	0.00922886	0.293804487	0.016237578	0.3299319	XI
i=4	0.033216333	0.01640241	0.225656333	0.106845693	0.382120769	XI
Tot	0.058117152	0.03758267	0.762811684	0.141488495	1	
	XI	XI	XI	XI		
Proportion d'accord observée = Ho = $\sum X_{ii} = 0.4109$						
Kappa = $(Ho-Hc) / (1-Hc) = (0.4109-0.32013) / (1-0.32013) = 0.13351$						

i: indice de vulnérabilité

Tableau 32: Matrice des résultats de proportion d'accord Ho de Kappa

	DRASTIC		GOD		MINNESOTA		EVARISK	
	Ho	Coef. K	Ho	Coef. K	Ho	Coef. K	Ho	Coef. K
DRASTIC	1	1						
GOD	0.42661	0.08998	1	1				
MINNESOTA	0.12526	-0.09903	0.34356	0.09875	1	1		
EVARISK	0.26076	-0.08576	0.52944	0.03085	0.4109	0.13351	1	1

Tableau 33: Graphes de comparaison de surface des indices de chaque méthode prises deux à deux



Aux vues du Tableau 33, les méthodes comparées deux à deux donnent des résultats de variation d'indices qui oscillent entre -1 et $+1$ pour 90% du territoire. Ces résultats semblent en coïncidence avec les interprétations du chapitre précédent. Si on regarde les valeurs données par le coefficient de Kappa (Tableau 32), on observe que pour deux des comparaisons le test n'est pas fiable, puisque les proportions d'accord observées (H_o) sont inférieures aux proportions d'accord sous l'hypothèse d'indépendance (H_c) donc non interprétables (il s'agit des comparaisons DRASTIC/Minnesota et DRASTIC/EVARISK). Pour les autres comparaisons, la valeur maximum atteinte est de 0.13. On peut donc en déduire que l'accord (non attribuable au hasard) existant entre les différentes méthodes est très faible. Il semble donc que les méthodes n'évaluent pas la vulnérabilité par les mêmes indices.

On remarque que Minnesota surévalue la vulnérabilité d'un indice sur 52 % du territoire par rapport à la carte DRASTIC. D'après la carte de comparaison (Annexe VIII) ces zones de surévaluation se situent au niveau du bassin de la rivière Jacques-Cartier et au sud du bassin de la rivière Sainte-Anne (zones de sables et graviers) (Annexe V) et au nord-ouest, dans les zones de roc. La carte de comparaison permet de mettre en évidence le fait que la méthode Minnesota surévalue la vulnérabilité des zones de fortes vulnérabilité mais sous-évalue les zones de faible vulnérabilité. En effet, les zones de till en couverture discontinues sur le roc (T_v) sont classées comme zones de faible vulnérabilité par les deux méthodes mais sont sous évaluées de 1 indice par la méthode du Minnesota. L'association observée au niveau de ces deux cartes est donc importante, mais si on regarde la valeur du H_o (0.125) la proportion d'accord est très faible. C'est la plus faible observée parmi toutes les comparaisons effectuées. En effet seulement 13% de la surface est évalué par les deux méthodes avec le même indice.

Au niveau de la comparaison EVARISK et DRASTIC, la même remarque peut être faite. EVARISK sous-évalue la vulnérabilité d'un indice sur 59% du territoire par rapport à la carte DRASTIC. D'après l'Annexe VIII c'est le cas surtout dans les zones de rocs (visualisation des zones de rocs avec l'annexe VI). Ainsi, là encore on obtient une bonne association au niveau des deux cartes, mais la valeur de Kappa (0.26) nous indique un faible accord.

Si on compare les deux cartes (EVARISK et Minnesota), on s'attend donc à un résultat significatif en matière d'accord. On observe effectivement un accord appréciable (que l'on peut qualifier de modéré d'après l'échelle d'interprétation de Kappa (Tableau 26) mais le graphique montre une répartition de fréquence d'indice très étalée. Même si 41% du territoire est évalué de

manière identique, 25% est surévalué de 1 indice, 11% sous-évalué et 17% sous-évalué de 2 indices. Cela vient du fait que la carte EVARISK présente une évaluation de la vulnérabilité identique sur une grande partie du territoire. Les accords entre les deux méthodes se situent surtout au niveau des zones de roc et sur des zones étalées au niveau du bassin de la rivière Jacques-Cartier et au sud-est du bassin de la rivière Sainte-Anne.

EVARISK et GOD sont les deux cartes qui montrent le meilleur accord avec 53% de la surface évaluée par le même indice. Pourtant la valeur du test de conformité donne un coefficient de Kappa de 0.03. Cela veut dire que l'accord entre les deux méthodes est du au hasard.

En comparant la méthode EVARISK avec la méthode Minnesota on se rend compte d'un certain étalement. L'évaluation de la vulnérabilité par la méthode EVARISK présente une certaine homogénéisation de l'indice de vulnérabilité sur le territoire, de plus les valeurs observées ne mettent pas en évidence les valeurs de vulnérabilité auxquelles on s'attendrait pour les aquifères confinés et les aquifères de sables et graviers des bassins des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier. L'homogénéité de la carte de vulnérabilité EVARISK explique les accords et associations observés avec GOD et DRASTIC.

La méthode GOD comparée aux méthodes Minnesota et DRASTIC fait apparaître des graphiques équilibrés. En effet on remarque un équilibre entre une évaluation identique de la vulnérabilité et une surévaluation d'un indice pour Minnesota dans le cas de la comparaison entre GOD et Minnesota et une surévaluation d'un indice pour GOD dans le cas de la comparaison avec DRASTIC. Les valeurs d'accord observée Ho indiquent un degré d'accord modéré tandis que les valeurs d'accord non du au hasard (coefficient De Kappa) indiquent de faibles accords.

Par rapport à la méthode DRASTIC, GOD tend à évaluer les aquifères granulaires de manière identique, mais tend à surévaluer les aquifères rocheux. Il est à noter que GOD permet de tenir compte de la présence et la fréquence de fractures dans le roc.

Par rapport à la méthode GOD, Minnesota surévalue les aquifères granulaires des deux bassins. Cela pourrait être attribué à la précision de la méthode Minnesota. La carte de niveau 1 ne nécessite pas une grande précision en ce qui concerne la connaissance du niveau de la nappe. Cela rend la méthode plus sécuritaire. Par contre, on remarque que les zones de till (Tv et Tvr) sont sous évaluées par la méthode Minnesota.

4.3 Comparaison des paramètres.

Jusqu'à présent il était question de comparaison de méthodes entre elles. Cela nous a permis de déterminer si les évaluations étaient comparables d'une méthode à l'autre. Dans le cas où les évaluations diffèrent, cela peut être dû aux paramètres utilisés, mais également à la manière de traiter les paramètres et de les utiliser. Une comparaison statistique des paramètres d'une méthode permettrait de déterminer l'indépendance statistique des paramètres, et le poids relatif à chaque paramètre pour la méthode. Une comparaison statistique d'un paramètre (par exemple le paramètre formations superficielles) utilisé par plusieurs méthodes mais traité différemment permettrait de déterminer la variation d'évaluation selon l'utilisation des données brutes. Malheureusement, par manque de temps et du fait de la difficulté à faire fonctionner le logiciel ISATIS, ces tests n'ont pu être effectués, bien que théoriquement ils aient été étudiés tel que montré ci-dessous :

La carte des formations superficielles :

Lors de l'énumération des données nécessaires à l'application de chacune des quatre méthodes, on a pu remarquer que la carte des formations superficielles est une information nécessaire à chacune des méthodes sauf pour la méthode EVARISK. Cette information paraît donc essentielle pour l'évaluation de la vulnérabilité, mais suivant la méthode elle n'est pas traitée de la même manière. Une comparaison des cartes de formations superficielles obtenues après traitement par chacune des méthodes permettrait de déterminer dans quelle mesure le traitement peut influencer le paramètre indépendamment de l'utilisateur et donc de déterminer dans quelle mesure le choix d'une méthode plutôt qu'une autre va influencer le résultat final. Le but serait de tester l'association existante entre les différentes évaluations. Pour établir la corrélation entre l'évaluation d'un paramètre pour diverses méthodes, cinq types de tests ont été répertoriés dans la littérature :

- (1) Le co-krigeage qui est une méthode de corrélation permettant une estimation de corrélation croisée entre plusieurs variables. La considération simultanée de toutes les variables permet de minimiser la variance de l'erreur ;
- (2) Le modèle de covariance croisée;
- (3) Le nuage de corrélation;
- (4) Chaînes de Markov modifiées. Technique employée par Rosen (1994) qui est dérivée des chaînes de Markov (méthode développée dans les années 1970 permettant l'analyse de séquences géologiques).

En théorie, une chaîne de Markov, représente une séquence dans laquelle l'état en un point est partiellement dépendant (en terme de probabilité) de l'état qui le précède. Les chaînes de Markov sont, à l'origine, utilisées pour des investigations géologiques.

Le principe en est que, pour une suite d'information à l'intérieur d'une suite de séquences il est intéressant de déterminer la nature des transitions d'un état à un autre, plus que la position relative des états dans la séquence.

(5) La méthode de Takaguchi.

Le nuage de corrélation et les chaînes de Markov modifiés ne permettent qu'une étude de corrélation directe entre les paramètres or le but recherché est de déterminer si l'information est regroupée de la même manière selon les différentes méthodes.

Le co-krigeage semblerait une méthode adaptée pour la réalisation d'une telle étude. Étant donné la taille du territoire d'étude, la réalisation d'un co-krigeage nécessite l'emploi d'un logiciel de géostatistique.

La méthode de Takaguchi (communication orale, service de consultation en statistique de l'Université Laval) a été développée dans le cadre de contrôle de qualité pour permettre d'évaluer l'importance de chaque paramètre dans la méthode. Il serait intéressant d'effectuer un tel test pour les paramètres d'une même méthode afin de déterminer l'indépendance des paramètres. Par contre, l'utilisation de ce type d'analyse pour la comparaison d'un paramètre de deux méthodes s'avérerait compliqué.

Il existe énormément de logiciels de traitement statistique :

GEOPACK : c'est un logiciel de géostatistique, disponible sur Internet, qui fonctionne directement sous le système d'exploitation DOS. Ce logiciel permet d'effectuer des études de corrélations. Mais la capacité de stockage des données à traiter se limite à un tableau d'environ 10000 lignes, de plus des fichiers d'un maximum de 10 variables (avec leur localisation x et y et un numéro d'échantillon) pourront être utilisés. Étant donné ces limitations de capacités, ce logiciel serait écarté pour une telle étude.

STATISTICA : c'est un logiciel de statistique non utilisable dans le cas présent où la distribution spatiale des données est à prendre en compte. Toutefois ce logiciel s'avérerait utile dans le cas de la réalisation des études statistiques de corrélations directes à partir des maillages.

MATLAB v5.0, : c'est un logiciel de calcul matriciel numérique développé par *The MathWorks Inc.* Il s'agit d'un logiciel puissant qui permet l'utilisation d'un grand nombre de formules mathématiques, mais qui permet également la programmation des formules ou concepts particuliers, spécifique aux besoins de chaque étude. De plus la réalisation d'un programme utilise un langage spécifique à MATLAB, mais dont la structure, simple, ressemble au Fortran. Enfin, MATLAB permet de traiter facilement des matrices de 2000X2000. Ce logiciel serait un outil approprié pour une étude de ce type, mais l'étape de programmation de la démarche à adopter pour la comparaison statistique est trop importante pour que la méthode soit retenue comme la plus efficace.

ISATIS v7.0.1 : Il s'agit d'un logiciel de géostatistique développé par *Géovariances*. Il ne nécessite aucune programmation, permet un stockage de données important (jusqu'à 30 millions de points) et enfin permet de traiter des données géoréférencées. Cet outil utilise des concepts spécifiques à la géostatistique et s'avère donc plus précis et complet que des logiciels conventionnels de mathématiques. Ce logiciel est l'outil le mieux adapté à l'étude en cours de part son importante capacité de stockage, le gain de temps qu'engendre la quantité de concepts statistiques présents et la possibilité de déterminer les erreurs commises ou possibles.

4.4 Conclusion

Les résultats obtenus lors de la comparaison statistique des différentes méthodes impliquent que :

- (1) Les accords observés entre les méthodes sont très faibles. Il faut noter une certaine difficulté à statuer sur les résultats du test de Kappa.
- (2) La méthode EVARISK est écartée. Elle diffère des trois autres cartes dans l'évaluation des aquifères. Certaines associations sont mises en évidence, mais sont dues à la constance dans l'évaluation de la vulnérabilité de la méthode.
- (3) Au niveau de l'association entre méthodes :
 - DRASTIC et Minnesota présentent une bonne association avec 52% du territoire surévalué de un indice par Minnesota.
 - DRASTIC et GOD présentent un certain équilibre entre les valeurs d'accord (0) et une surévaluation de GOD de 1 indice.

- De même pour GOD et Minnesota, on observe une association équilibrée entre 0 et une surévaluation de 1 indice pour Minnesota.

(4) On peut en déduire que les trois méthodes évaluent la vulnérabilité de manière comparable, sachant que :

- Minnesota a tendance à surévaluer la vulnérabilité sur l'ensemble du territoire. Étant donné que l'on se base sur la carte de niveau 1, il est logique que l'évaluation soit sécuritaire.

- GOD évalue la vulnérabilité du roc comme étant de même vulnérabilité que les aquifères granulaires des bassins des rivières de la Sainte-Anne et de la Jacques-Cartier. Ceci représente une surévaluation de l'indice dans ces zones, mais sachant que la méthode tient compte de la présence de fractures dans le roc, il est normal que la vulnérabilité soit plus élevée que pour les autres cartes.

- DRASTIC présente l'avantage et le désavantage d'être évalué à l'aide de sept paramètres alors que Minnesota l'est avec deux (pour le niveau 1) et GOD avec quatre. Les coûts sont plus importants étant donné le plus grand nombre de paramètres, mais d'un autre côté l'évaluation est plus complète et la redondance des paramètres permet une certaine stabilité du résultat final.

(5) Il est difficile de se prononcer sur un choix de méthode, mais dans la situation du territoire étudié et les circonstances de l'étude, la méthode qui s'avérerait être l'objet du choix est la méthode du Minnesota. Elle nécessite peu de paramètres comparée à DRASTIC et l'évaluation du niveau 1 nécessite moins de temps et de moyens que les autres méthodes, tout en laissant la possibilité de raffiner l'évaluation avec l'aide d'un niveau 2.

(6) La méthode GOD serait préconisée dans le cadre de territoires présentant des zones d'aquifères rocheux fracturés.

Suggestions de travaux :

(7) Afin de pouvoir valider ces conclusions, on aurait besoin de données réelles de terrain de pollution diffuse. Pour cette étude, valider les méthodes entraîne l'obtention de données d'épandage d'un contaminant jouant le rôle d'un traceur et des données de qualité de l'eau souterraine en relation avec ces épandages. Par exemple, des données de concentration en nitrate dans les puits localisés dans des zones de vulnérabilité variées. Cela reviendrait à compléter l'étude par une étude de risque. En superposant une carte des valeurs de concentration du traceur (le nitrate) dans les puits de la région sur les cartes de vulnérabilité et en calculant les distances

qui sépare les puits des zones de vulnérabilité variable situées en amont, on peut déterminer le risque relatif à ces zones.

(8) Il aurait été également possible de valider la répartition des zones de forte vulnérabilité à l'aide d'un modèle de vulnérabilité spécifique tel que SEEPW, mais cette solution aurait été moins fiable que l'analyse de la superposition de données réelles de terrain à la carte de vulnérabilité.

(9) Tel qu'expliqué au point 4.3 de ce chapitre, une étude comparative des paramètres aurait été intéressante et aurait permis de compléter les résultats obtenus en comparant les méthodes deux à deux et en déterminant l'indépendance des paramètres pour une méthode. Mais, de part les difficultés rencontrées pour l'utilisation du logiciel ISATIS, cela n'a pu être fait. Ce serait toutefois, un bon exercice à effectué pour compléter une telle étude.

CHAPITRE 5 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5.1 Conclusions générales

En matière environnementale, la protection de la ressource en eau souterraine est une notion qui se développe de plus en plus. Étant donné les coûts engendrés par la restauration de sites contaminés, il est compréhensible que la priorité aille à la prévention. L'évaluation de la vulnérabilité est un des moyens de protection de la ressource et s'avère un outil efficace. En effet, la multiplicité des méthodes mises en évidence lors de la revue de littérature montre l'ampleur de l'intérêt pour l'approche prévention.

Il faut garder à l'esprit que :

- (1) Les cartes de vulnérabilité intrinsèque ont pour but de montrer les grandes tendances de la vulnérabilité pour l'affectation d'activités à risque. L'implantation d'une activité humaine à vocation agricole ou industrielle dans une MRC, nécessite une évaluation de la vulnérabilité spécifique sur le territoire.
- (2) L'estimation de la vulnérabilité sur un territoire donné est une évaluation relative. Les valeurs de vulnérabilité ne sont pas absolues. Tout le territoire est vulnérable mais certaines zones sont plus vulnérables que d'autres.
- (3) L'utilisation de ces cartes se limite à l'échelle pour laquelle elles ont été conçues. Les complexités hydrogéologiques ne peuvent être représentées sur des cartes compilées à petite échelle. L'échelle choisie pour la réalisation des cartes de vulnérabilité intrinsèques dépend de la quantité de données disponibles et du territoire couvert.

5.1.1 Conclusions relatives à l'application des méthodes à la MRC de Portneuf.

La méthode DRASTIC est, dans le cadre de cette étude, la méthode qui a servi de référence pour déterminer les variations d'évaluation de la vulnérabilité. Il s'agit de la méthode officielle des États-Unis. Elle est utilisée dans beaucoup d'études et sur des territoires diversifiés, ce qui va dans le sens d'une standardisation. DRASTIC est une méthode à cotation numérique élaborée de

manière empirique très controversée du fait de sa large utilisation. Un des points les plus discuté est le nombre de paramètres. Un grand nombre de paramètres permet une meilleure connaissance du milieu et permet une stabilité des résultats (plus il y a de paramètres moins l'indice final est affecté par le résultat d'un paramètre en particulier). D'un autre côté, un nombre trop élevé de paramètres crée des difficultés à se procurer l'information requise et des coûts élevés pour la cueillette de données. Un autre point controversé est son système de cotation. Il a été élaboré pour correspondre aux conditions qui prévalent aux États-Unis, ce qui a pour conséquence que les paramètres ne sont pas ajustés aux conditions hydrogéologiques Québécoises. L'exemple le plus significatif est donné par le paramètre profondeur à la nappe. Au Québec la nappe se situe le plus souvent entre 0 et 8 mètres de profondeur et les intervalles DRASTIC pour ce paramètre vont de 0 à >31 mètres, ce qui engendre une carte de profondeur à la nappe assez homogène sur le territoire utilisé dans le cadre de cette étude.

La méthode GOD est également une méthode à cotation numérique élaborée de manière empirique. Elle diffère de la méthode DRASTIC dans le sens où elle a été développée pour les conditions hydrogéologiques qui prévalent en Grande Bretagne et le nombre de paramètre n'est que de quatre.

La méthode des ressources naturelles du Minnesota est une méthode cartographique. L'évaluation de la vulnérabilité par cette méthode (pour le niveau 1) ne requiert pas énormément de données et sa réalisation est simple. Un second niveau permet de raffiner l'évaluation lorsque les données ou les moyens sont disponibles. Ce qui permet une certaine liberté dans la réalisation des cartes.

La méthode EVARISK est une méthode analytique. Elle permet d'évaluer, en premier lieu, la vulnérabilité spécifique à quatre type de contaminants, mais, d'après l'auteur, elle peut s'employer en tant que méthode de vulnérabilité intrinsèque. Elle n'évalue la vulnérabilité que sur le premier mètre de sol.

Les résultats obtenus pour les méthodes DRASTIC, GOD et Minnesota en terme de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dans la MRC de Portneuf indiquent que les formations aquifères situées dans les sables et graviers sont celles qui sont le plus vulnérables à la contamination. Ces formations se trouvent principalement dans les bassins des rivières Sainte-Anne et Jacques-Cartier. Le fort indice de vulnérabilité observé pour ces aquifères granulaires de surface peut être expliqué par la présence de sols généralement sableux, une zone vadose très

perméable et des pentes relativement faibles. Parmi ces aquifères, ce sont les sables et graviers deltaïques qui occupent la plus grande superficie.

Les aquifères au roc ont été évalués par les quatre méthodes, même s'ils ne constituent pas l'essentiel du mémoire. Leur évaluation manque de précision du fait du manque de données. Ces secteurs présentent des indices de vulnérabilité moyens à faibles pour GOD, Minnesota et DRASTIC et souvent plus élevés pour la méthode EVARISK. Un problème se pose toutefois pour la méthode EVARISK. Les zones de roc affleurants ne peuvent être évaluées par la méthode car elles ne sont pas reconnues comme formation pédologique. Les zones de roc affleurants constituent les régions où se fait la recharge des aquifères rocheux. Les impacts d'une éventuelle contamination sont donc plus importants. Le fait de ne pouvoir les évaluer constitue un handicap pour cette méthode.

Les aquifères confinés ne sont pas évalués pour la méthode DRASTIC qui préconise la réalisation d'une seconde carte spécifique à ces aquifères. La méthode du Minnesota évalue la vulnérabilité de la zone vadose et donc indirectement des aquifères confinés s'il s'agit du premier aquifère rencontré. Cette méthode permet également l'évaluation d'une couche spécifique à l'évaluation des aquifères confinés. La méthode GOD évalue les aquifères confinés au même titre que les autres. Pour la méthode EVARISK ces aquifères ne se distinguent pas. Ils sont classés en majorité comme moyennement vulnérables alors que les autres méthodes les évaluent comme peu vulnérables ce qui paraît logique du fait de la protection que procure les matériaux fins, peu perméables, qui recouvrent ces nappes.

5.1.2 Outils informatiques et statistiques

De plus en plus, l'évaluation de la vulnérabilité s'effectue à partir d'outils informatiques tels que les systèmes d'information géographique (SIG). Ces outils permettent de mieux gérer les données et de faciliter l'accès et le traitement de l'information. L'élaboration de cartes de vulnérabilité à partir d'outils tels que Mapinfo, IDRISI, ArcInfo permet une mise à jour des données et donc des cartes au fur et à mesure de la disponibilité des données.

Remarque : Une étude de comparaison de méthodes effectuée au sein de l'université Purdue utilise une interface conviviale permettant l'entrée de données nécessaires à la réalisation des cartes de vulnérabilité pour chacune des méthodes. Cette étude montre à quel point l'influence des SIG prend de l'ampleur au niveau de ce type de projets.

Il est parfois difficile de comparer des cartes de vulnérabilité. D'une part parce que les méthodes d'évaluation ne sont pas forcément compatibles et d'autre part parce que l'application d'une méthode est subjective. Une méthode appliquée par deux personnes différentes ne donnera pas forcément les mêmes résultats. C'est pourquoi la réalisation de l'étude de comparaison statistique entre différentes méthodes appliquées par une même personne est intéressante. Elle permet de déterminer dans quelle mesure deux méthodes évaluent la vulnérabilité des aquifères sans tenir compte de la subjectivité de l'utilisateur.

La comparaison des méthodes d'évaluation montre qu'il est difficile de se prononcer sur un choix de méthode. Toutefois si on se fie sur l'étude réalisée :

(1) La méthode EVARISK est écartée. Elle diffère des trois autres cartes dans l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères. Certaines associations sont mises en évidence, mais sont dues à la constance dans l'évaluation de la vulnérabilité de la méthode.

(2) Les trois autres méthodes évaluent la vulnérabilité de manière comparable, sachant que :

La méthode du Minnesota est très facile d'application car elle ne nécessite que deux paramètres (niveau d'eau et pédologie). Pour des zones d'intérêt (zones plus vulnérables, zones en développement, zones ayant plus d'informations disponibles etc.) on peut effectuer des cartes de niveau 2 qui sont plus précises. Dans le cas de la réalisation d'une carte de niveau 1, la méthode Minnesota a tendance à sur évaluer la vulnérabilité sur l'ensemble du territoire.

GOD est une méthode à 4 paramètres qui permet d'évaluer la vulnérabilité des aquifères confinés et non-confinés. Les résultats sont intégrés sur une seule carte, ce qui est propice à la planification de l'aménagement du territoire. Elle évalue la vulnérabilité du roc comme étant de même vulnérabilité que les aquifères granulaires du bassin de la rivière Jacques-Cartier et du sud-est du bassin de la rivière Sainte-Anne (Annexe V). Ceci représente une surévaluation de l'indice dans ses zones, mais sachant que la méthode tient compte de la présence de fractures dans le roc, il est normal que la vulnérabilité soit plus élevée.

La méthode DRASTIC ne semble pas souffrir du fait que le système de cotation a été élaboré pour des conditions hydrogéologiques différentes de celles qui prévalent au Québec, puisque l'évaluation est comparable à celle obtenue par les méthodes GOD et du Minnesota. DRASTIC présente l'avantage et le désavantage d'être évalué à l'aide de 7 paramètres alors que Minnesota l'est avec 2 et GOD avec 4. La redondance des paramètres dans la méthode DRASTIC est bon

pour la stabilité des résultats, mais peut engendrer des coûts importants reliés à la cueillette de données.

Ainsi, dans la situation du territoire étudié et les circonstances de l'étude, la méthode privilégiée est la méthode du Minnesota. Elle nécessite peu de paramètres comparé à DRASTIC et l'évaluation du niveau 1 nécessite moins de temps et de coûts que les autres méthodes, tout en laissant la possibilité de raffiner l'évaluation avec l'aide d'un niveau 2. Elle permet de réaliser une carte de niveau 3 spécialement pour les aquifères confinés. La méthode GOD serait préconisée dans le cadre de territoires présentant des zones d'aquifères rocheux fracturés en plus des zones granulaires en plus des zones granulaires. La méthode DRASTIC devrait être utilisée dans le cas où la quantité de données disponible est importante. Dans le cas où il y a présence d'aquifères confinés comme première formation aquifère rencontrée, DRASTIC, GOD et Minnesota permettent de visualiser les aquifères sur la même carte, mais DRASTIC permet (et ses concepteurs le préconisent) la réalisation d'une seconde carte pour les aquifères confinés.

5.2 Recommendations

(1) Pour effectuer l'évaluation de la vulnérabilité il faut déterminer :

- le but de l'évaluation de la vulnérabilité (étude régionale ou étude de caractérisation plus pointue);
- les facteurs limitatifs divers, d'ordre monétaires, effectifs humains ou matériels (accessibilité à des supports informatiques);
- l'échelle de réalisation.

(2) L'étude de vulnérabilité doit être réalisée par des professionnels qualifiés que sont les hydrogéologues ou ingénieurs en eaux souterraines, des scientifiques environnementaux, des quaternaristes ou des géomorphologues, car elle nécessite le jugement de l'utilisateur dans son choix et son application.

(3) Il faut standardiser la notion de vulnérabilité et élaborer une approche générale acceptable dans l'utilisation de la méthode, dans sa cartographie et dans la détermination des symboles.

(4) Il ne faut pas négliger un territoire qui présente un indice de vulnérabilité plus élevé que sur le reste du territoire sous prétexte qu'il se situe dans une région peu menacée.

5.2.1 Travaux recommandés en complément d'une évaluation de vulnérabilité dans le cadre de l'étude dans la MRC de Portneuf

Les formations deltaïques, qui sont les aquifères les plus exploités dans la MRC, occupent un grand territoire. Au-dessus de ces aquifères se retrouvent des activités humaines de toutes sortes (agriculture, exploitation de matériaux granulaires, sites d'enfouissement etc.), ce qui engendre un risque de contamination d'autant plus important que ces zones sont classées comme les zones les plus vulnérables de la carte. Une fois la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque terminée, il est recommandé de réaliser une carte de risque en fonction des faits polluants. Le but d'une carte de risque est de pouvoir déterminer un facteur de risque non seulement en fonction des propriétés du milieu mais surtout des particularités du polluant. La carte est faite en superposant à la carte de vulnérabilité générale, une carte sur laquelle les activités humaines possédant un risque de contamination de la nappe sont répertoriées et pondérées en fonction de la toxicité du contaminant. Les résultats obtenus seront qualitatifs plus que quantitatifs. Selon l'endroit où le contaminant est appliqué, le risque de pollution sera plus ou moins important.

Les conclusions établies dans le cadre de la comparaison des méthodes sont des conclusions préliminaires. Les conclusions établies au chapitre 4 permettent une bonne comparaison des méthodes mais ne permettent pas de statuer sur les causes des variations entre méthodes. Ainsi, il serait intéressant d'effectuer deux types de travaux. Le premier concerne une étude comparative des paramètres par co-krigeage ce qui permettrait de voir le comportement des paramètres et leur importance dans chaque méthode. Le second concerne une étude comparative de mêmes données utilisées par deux méthodes différentes grâce au test de Takaguchi. Cela permettrait de voir comment la manière de traiter l'information peut influencer le résultat. Enfin, afin de pouvoir valider ces conclusions et de statuer sur la validité d'une méthode par rapport à une autre dans un contexte réel, on aurait besoin de données réelles de terrains de pollution diffuse. Il serait possible de valider les méthodes dans le cas de cette MRC grâce à l'obtention de données d'épandage et de concentration en nitrate disponibles dans les puits localisés dans des zones de vulnérabilité variées.

RÉFÉRENCES

- AGEOS 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. EVARISK : Démonstration de l'applicabilité. Rapport scientifique annexe au rapport d'activité No 6, mars- septembre 1997.
- AGEOS et INRS-Eau. 1997. 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 5, novembre 1996- février 1997, 88 p.
- Albinet, M. et Margat, J. 1970. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bulletin du BRGM (deuxième série), section III, No 4, p 13-22.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R. et Hackett, G. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution in potential using hydrogeologic settings. EPA/600 2-87 035.
- Atkinson, S.F. et Thomlinson, J.R. 1994. An examination of groundwater pollution potential through GIS modeling. ASPRS/ACSM, <http://www.sgi.ursus.main.../acsm/ac94007.html>, 79p.
- Aubre, F. 1992. Développement d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. Mémoire de maîtrise, École des Gradués Université Laval, Faculté des Sciences et Génie, 249 p.
- Banton, O., Gosselin, M-A. et Larocque, M. 1997. Outil d'évaluation des risques de contamination des eaux souterraines par les sources diffuses. EVARISK 1.0, Manuel d'utilisation, version préliminaire, INRS-Eau, 65 p.

- Bedient, P.B., Rifai, H.S. et Newell C.J. 1994. Groundwater Contamination Transport and remediation. Prentice Hall PTR Englewood Cliffs - New Jersey 07632 - ISBN 0-19-362592-3.
- Bencini, A., Cazzaroli, G., Gargini, A. et Pranzini G. 1995. La qualité des eaux souterraines et sa relation avec la vulnérabilité à la pollution des aquifères. Un exemple en Toscane (Italie) : la plaine de Florence. Hydrogéologie, No 3, p. 59-72.
- Berg, R.C., Kempton, J.P. et Cartwright, K. 1984. Potential for contamination of shallow aquifers in Illinois. Département de l'Énergie et des Ressources Naturelles de l'Illinois, Commission Géologique de l'Illinois, circulaire 532, 30 p.
- Berg, R.C., Abert C.C., 1994. Large-scale aquifer sensitivity model. Département de l'Énergie et des Ressources Naturelles de l'Illinois, Commission Géologique de l'Illinois, v. 24, No. 1, p. 34-42.
- Bernard, P. 1993. Théorie et application du coefficient de Kappa. Thèse de doctorat, Université Laval, ISBN: 0-315-85514-2.
- Bridson, M.S., Bohn, M.F. et Madison, F.W. 1994. Evaluation of groundwater susceptibility assessment systems in Dane County, Wisconsin. Université de Wisconsin-Extension, Commission Géologique et d'Histoire Naturelle du Wisconsin , rapport de dossier publique 94-03, 52 p.
- Carlson, C.G., Dean R. et Lemme, G. 1990. Prescription planning: an approach to nonpoint pollution problems. Journal de Conservation des Sols et de l'Eau, vol. 45, No. 2, p. 239-241.
- Champagne, L. 1990. Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, MRC de Montcalm. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Département de Génie Minéral, École Polytechnique. 274 p.
- Champagne, L. et Chapuis, P. 1993. Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode DRASTIC. Sciences et Techniques de l'Eau, vol. 26, No. 3, p. 169-176. .

- Civita, M. 1990. La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento [Assessment of aquifer vulnerability to contamination]. Proc. 1st Conv. Naz. « Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee : Metodologie, Technologie e Obiettivi », Marano sul Parano, v. 3, p. 39-86.
- Civita, M.V. 1995. A methodology for delineation and design of spring protection area system. Publ. No. 159 de GNDICI-CNR, Task unit 4.1.
- Civita, M.V. et De Maio, M. 1997. Assessing groundwater contamination risk using ARC/INFO via GRID function. 32 p.
<http://www.esri.com/base/common/userconf/proc97/PROC97/TO600/PAP591/P591.HTM>.
- Cloutier, M., Parent, M. et Bolduc, A. 1997. Géologie des formations superficielles- Région de Saint-Marc-des-Carières, Québec. Dossier public 3544, Commission Géologique du Canada.
- Cooper, B., Navulur, K., Engel, B.A., Hahn, L., 1997. Communication :
<http://pasture.ecn.purdue.edu/~aggrass/GROUNDWATER/>
 - Regional scale models :
http://pasture.ecn.purdue.edu/~aggrass/GROUNDWATER/regional_models.html
 - Field scale models :
http://pasture.ecn.purdue.edu/~aggrass/GROUNDWATER/fieldscale_models.html
 - Geographic information systems :
<http://pasture.ecn.purdue.edu/~aggrass/GROUNDWATER/power/rast.gif>
 - DUES. <http://danpatch.ecn.purdue.edu/~engelb/agen526/exam1.html>
- De Smedt, P., De Breuk, W., Loy, W., Van Autenboer, T. et Van Dijck, E. 1987. Groundwater vulnerability maps. Aqua No 5, pp 264-267.
- Domenico, P.A. et Schwartz, F.W. 1990. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & sons, ISBN 0-471-50744-x, GB1003.2.D66, 824 p.

- Environnement Canada, Section de la rédaction et des publications. 1997. Les eaux souterraines, trésors cachés de la nature. Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, <http://www.ns.doe.ca/french/udo/trea.html>, 11 p.
- EPA. 1993. A review of methods for assessing aquifer sensitivity and groundwater vulnerability to pesticide contamination. EPA, office of water (4602), 813-R-93-002, 147 p.
- Fagnan, N. 1998. Cartographie hydrogéologique régionale et vulnérabilité des aquifères de la MRC de Portneuf. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Géoressources, 215 p.
- Fetter, C.W. 1993. Contaminant hydrogeology. Macmillan Publishing Company, ISBN 0-02-337135-8, TD426.F48.
- Foster, S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. TNO Comm. Hydrol. Res. Proc. et Information 38, p 69-86.
- Foster, S. et Hirata, R. 1991. Groundwater pollution risk assessment, a methodology using available data. CEPIS Rapport technique, Lima, Perou, 2nd édition, 73 p.
- Foster, S.S.D. et Skinner, A.C. 1995. Groundwater protection: the science and practice of land surface zoning. Groundwater quality: remediation and protection. Proceedings de conférence de Prague. Publ. AIH No 225. p. 471-482. mai 1995.
- Foster, S.S.D., 1998. Groundwater recharge and pollution vulnerability of British aquifers : a critical overview. In : Robins, N.S. (ed.) Groundwater pollution , aquifer recharge and vulnerability. Geological society, London, special publications, 130 p., p. 7-22.
- Fréchette, R. 1987. Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, face au risque de contamination engendré par l'usage des pesticides- Caractérisation d'aquifères situés au Québec. Mémoire de maîtrise ès sciences (eau), Université du Québec, INRS-Eau. 112 p.
- Freeze, R.A. et Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice Hall Englewood Cliffs NJ 07632, ISBN 0-13-365312-9, 604 p.

- Gélinas, P., Lefebvre, R. et Therrien, R. 1997. Notes de cours d'hydrogéologie. GGL-10355, Département de Géologie et de génie géologique, Université Laval.
- Girard, F. 2000. (en préparation) Architecture et hydrostratigraphie d'un complexe morainique et deltaïque dans la région de Saint-Raymond de Portneuf, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Géoressources.
- Kalinski, R.J., Kelly, W.E., Bogardi, I., Ehrman, R.L. et Yamamoto D. 1994. Correlation between DRASTIC vulnerabilities and incidents of VOC contamination of municipal wells in Nebraska. *Groundwater* vol. 32, No. 1, Janvier-Février.
- Keefer, D.A. 1995. Potential for agricultural chemical contamination of aquifers in Illinois: 1995 revision. Département de l'Énergie et des Ressources Naturelles, Commission Géologique de l'Illinois, *géologie environnementale* 148, 28 p.
- Lafrance, P., Banton, O., Campbell, P. et Villeneuve, JP. 1989. Des pesticides dans l'eau souterraine. *Réseau environnement*, février 1989, p. 11-14.
- Larose-Charrette, D. 2000. Modélisation hydrogéologique des aquifères libres de la MRC de Portneuf. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Géoressources.
- Lefebvre, R. 1997. Notes de cours écoulement en milieu poreux. GEO-9602/GLG-65146, INRS-Géoressources.
- Lemme, G., Carlson, C.G., Dean R. et Khakural, B. 1990. Contamination vulnerability indexes: a water quality planning tool. *Journal de Conservation des Sols et de l'Eau*, vol. 45, No. 2, p. 349-351.
- Liddle, S.K. et Ganley, M. C. The use of the DRASTIC classification system in surveys of agricultural pesticides in drinking water wells. *Research triangle institute*, p. 75-82.
- Lyman, W.J., Reehl, W.F. et Rosenblatt D.H. 1982. Handbook of chemical property estimation methods. *Environmental behavior of organic compound*. Mc Graw-Hill Co.

- Lynch, S.D. 1994. Preparing input data for a national-scale groundwater vulnerability map of Southern Africa. <http://www.ccwr.ac.za/~lynch2/drastic.html>, 10p.
- Margat, J. 1991. La vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions, conception - estimation - cartographie. Institut Européen de l'eau, 9 p.
- Maxe, L. et Johansson, P-O. 1998. Assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area as indicators. *Hydrogeology journal*, AIH, vol. 6 No. 3, p 441-449.
- Michaud, Y. et Lefebvre, R., (éd.) 2000. (en préparation). Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires de surface. Guide préparé par le Centre Géoscientifique de Québec pour le MEF, contributions de Michaud, Y., Lefebvre, R., Fagnan, N., Bourque, É., Boisvert, É., Martel, R., Parent, M., Bolduc, A., Fortier, R., Girard, F., Larose-Charrette, D., Paradis, D., Murat., V., Therrien, R., Savard, M., et Vitali, F.
- Monfet, J. 1979. Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée. Ministère des Richesses Naturelles, service de l'hydrométrie, H.P.-51, ISBN 2-551-03851-0, 35 p.
- Murat, V., Martel, R., Michaud, Y., Fagnan, N., Beaudoin, F., Therrien, R., 2000a. Cartographie hydrogéologique régionale du Piémont Laurentien dans la MRC de Portneuf: Comparaison des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité. Commission Géologique du Canada, dossier Public numéro : 3664-d.
- Murat, V., Martel, R., Michaud, Y., Therrien, R., 2000b (version préliminaire). Guide d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Rapport présenté au Ministère de l'Environnement du Québec, Service des pesticides et des eaux souterraines.
- National Water Research Institute Software. 1997. an expert system for assessing the potential for groundwater contamination by pesticides (EXPRES v 2.2). <http://gwrp.cciw.ca/expres.html>.

- Navulur, K.C.S., Cooper, B.S. et Engel, B.A. 1995. Groundwater vulnerability evaluation to nitrate and pesticide pollution on a regional scale using GIS. Présenté à la conférence internationale d'été ASAE à Chicago, Il., 20 p.
- Navulur, K.C.S. et Engel, B.A. 1997a. Estimation of groundwater vulnerability for large Areas to nitrate pollution using geographic information systems (GIS). Communication: Wetnet: water resources projects, <http://ingis.acn.purdue.edu:9999/projects/data/drastic.html>, 11p.
- Navulur, K.C.S. et Engel, B.A. 1997b. Predicting spatial distributions of vulnerability of Indiana State aquifer systems to Nitrate leaching using a GIS. Communication: http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/navulur_kumar/my_paper.html
- Paradis, D., Bernier, P.J. et Levallois, P. 1991. Qualité de l'eau souterraine dans la MRC de Portneuf. Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Département de Santé Communautaire du Centre Hospitalier de l'Université Laval, 13 p.
- Parascandola, MF. 1980. Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution- Essai d'analyse sémantique- Essai de représentation cartographique. Mémoire, Université des Sciences et Techniques du Languedoc- Académie de Montpellier.
- Petit Larousse illustré, 1995.
- Pukkoneni, E. et Teiter, K. 1995. Compilation of groundwater vulnerability map of Island Saaremaa by GIS means. GIS-Baltic sea states'95, Exhibition, conference- Tallinn, 1995, <http://www.ciesin.ee/gis95/abstracts/pukkon.html>, résumé, 1 p.
- Raymond, R., Laflamme, G. et Godbout, G. 1976. Pédologie du comté de Portneuf. Bulletin Technique No. 18, 164 p.
- Robins, N.S. (éd.) 1998. Groundwater pollution, aquifer recharge and vulnerability. Geological Society, London, special publications No. 130, 224 p.

- Ronneseth, K., Wei, M. et Gallo, M. 1995. Evaluating methods of aquifer vulnerability mapping for the prevention of groundwater contamination in British Columbia. Publ. solutions'95 IAH, 6 p.
- Rosen, L. 1994. A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *Groundwater*, vol. 32, No. 2, p. 278-285.
- Rosen, L. 1995. Estimations of hydrogeological properties in vulnerability and risk assessments. <http://search.chalmers.se/koala>.
- Rupert, M., Dace, T., Maupin, M. et Wicherski B. 1991. Groundwater vulnerability assessment, snake river plain, southern Idaho. Idaho Department of Health and Welfare, Division of Environmental Quality, 25 p.
- Schleyer, R. 1994. Quantification of groundwater vulnerability using statistical methods. Future groundwater resources at risk (proceedings de la conférence Helsinki, juin 1994), publ. AIH No. 222, p. 85-95.
- Schmidt, R.R. 1987. Groundwater contamination susceptibility in Wisconsin. Wisconsin groundwater management plan, report No 5, PUBL-WR-177-87, 27 p.
- Sotornikova, R. et Vrba, J., 1987. Some remarks on the concept of vulnerability maps. In vulnerability of soil and groundwater to pollutants (W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegeningh, eds.), TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and Information No. 38, p. 471-476.
- Struckmeier W.F., 1989. Types and uses of hydrogeological maps. *Memoirs of the Intl. Symp. On hydrogeological Maps as Tools for economic and Social Development*, Hannover, p. 17-30.
- The geologic sensitivity project workgroup. 1991. Criteria and guidelines for assessing geologic sensitivity of groundwater resources in Minnesota. Geologic sensitivity project workgroup, Department of Minnesota Natural Resources, division of waters, 122 p.

- Tim, U.S, Jain, D. et Liao, H-H. 1996. Interactive modeling of groundwater vulnerability within a geographic information system environment. *Groundwater*, vol. 34, No 4, p 618-627.
- Trojan, M. D. et Perry, J.A. 1988. Assessing hydrogeologic risk over large geographic areas. Station bulletin 585-1988 (Item No AD-SB-3421) Minnesota agricultural experiment station University of Minnesota, 65 p.
- Van Stempvoort, D., Ewert, L. et Wassenaar, L. 1992. AVI: A method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canada. PPWB pilot project, final report, septembre 1991- mars 1992, 18 p.
- Villeneuve, J.P., Banton, O., Lafrance, P., Blanchette, C., Deschênes S. 1987. Vulpest, version 2.0. Rapport INRS-Eau No. 234, Université du Québec, 88 p.
- Vrba, J. et Zaporozec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *AIH*, vol. 16, 131p.

ANNEXE I

**Répertoire non exhaustif des méthodes d'estimation
de la vulnérabilité.**



Table des matières de l'annexe I

1. LES MÉTHODES DE VULNÉRABILITÉ.....	135
1.1. MÉTHODES DES SYSTÈMES PARAMÉTRIQUES	135
1.1.1. <i>Aquifer water vulnerability index/ South Dakota aquifer contamination vulnerability maps</i> :	135
1.1.2. AVI.....	136
1.1.3. <i>La méthode modifiée de Civita</i>	138
1.1.4. DRASTIC	138
1.1.5. GOD.....	142
1.1.6. <i>Idaho's groundwater vulnerability project</i> :	144
1.1.7. <i>Greater Denver ground water sensitivity assessment</i> :	146
1.1.8. SCAM3 (<i>soil contaminant Attenuation Model</i>) :	147
1.1.9. SEEPAGE (<i>System for Early Evaluation of the Pollution Potential of Agricultural Groundwater Environments</i>).....	148
1.1.10. SOTORNIKOVA ET VRBA	150
1.1.11. WISM (<i>Wisconsin Susceptibility Model</i>).....	151
1.1.12. <i>La méthode Roeper</i>	152
1.2. MÉTHODES CONTEXTUELLES	153
1.2.1. <i>Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en Belgique</i>	153
1.2.2. <i>Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution</i>	156
1.2.3. <i>Leachability classes of Kansas soils</i> :	158
1.2.4. <i>Minnesota's geologic sensitivity methods/ Assessing Geologic Sensitivity of Ground water Resources in Minnesota</i>	159
<i>Identification des aquifères profonds</i>	166
1.2.5. <i>Potential for contamination of Shallow aquifer in Illinois</i>	166
1.2.6. <i>Wisconsin's groundwater management plan</i>	167
1.3. MÉTHODES ANALYTIQUES ET DE MODÉLISATION NUMÉRIQUE.....	169
1.3.1. <i>Assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area as indicators</i>	169
1.3.2. AQUIPRO :.....	171
1.3.3. EVARISK	172
1.3.4. SEEP/W	180
1.4. CONCLUSIONS ET NOTION DE RISQUE :.....	180
1.4.1. HEI	180
1.4.2. <i>méthode site (surface) impoundment assessment ou Legrand modifiée</i>	181
1.4.3. <i>Farm-A-Syst</i>	181
1.4.4. <i>Bachmat et Collin</i>	182
1.4.5. <i>Ground water contamination site raking methodology</i>	183
1.4.6. <i>Groundwater Ubiquity Score(GUS)</i>	183
1.4.7. <i>Hydro-Québec</i>	183
1.4.8. LEACH.....	184
1.4.9. <i>Landfill site rating (LSR)</i>	184
1.4.10. <i>Méthode Legrand</i>	184
1.4.11. <i>Pesticide index</i>	185
1.4.12. <i>Pesticide root zone model (PRZM)</i>	185
1.4.13. <i>Site rating methodology (SRM)</i>	185
1.4.14. <i>Site rating system</i>	186
1.4.15. VULPEST.....	186
1.4.16. <i>Waste-soil-site interaction matrix</i>	187
1.4.17. <i>Autres méthodes existantes</i>	188
1.4.17.1. CHEMRANK	188
1.4.17.2. CMLS	188

1.4.17.3. GLEAMS.....	188
1.4.17.4. LEACHM.....	189
1.4.17.5. MOUSE.....	189
1.4.17.6. OPUS.....	189
1.4.17.7. PATRIOT.....	189
1.4.17.8. PESTANS I et II.....	190
1.4.17.9. PRZM-2.....	190
1.4.17.10. RZWQM.....	190
1.4.17.11. SESOIL.....	190
1.4.17.12. VIP.....	191

Liste des illustrations.

<i>Figure 1 : Aperçu de la méthode DRASTIC.</i>	141
<i>Figure 2 : Aperçu de la méthode GOD.</i>	143
<i>Figure 3 : Organigramme de la méthode de cartographie de la vulnérabilité d'après De Smedt (1987)</i>	154
<i>Figure 4 : Détermination de l'indice de vulnérabilité fonction du temps de parcours de l'eau souterraine.</i>	163
<i>Figure 5 : La méthode EVARISK.</i>	178
<i>Figure 6 : paramètres concernant les informations sur la pédologie et sur la pente.</i>	179
<i>Figure 7 : informations sur la végétation.</i>	179

Liste des tableaux

Tableau 1 : indice de vulnérabilité de la méthode du Dakota du sud.....	136
Tableau 2 : Conductivité hydraulique estimée pour divers matériaux des « Canadian Prairies ».....	137
Tableau 3 : Relation entre Indice de Vulnérabilité de l'Aquifère (AVI) et résistance hydraulique.....	138
Tableau 4 : les 7 paramètres DRASTIC (Aller et al., 1987).....	140
Tableau 5 : Classification des indices DRASTIC (Aller et al., 1987).....	142
Tableau 6 : Classification des indices DRASTIC selon Mc Cormack (1986).....	142
Tableau 7 : Paramètres utilisés par la méthode GOD.....	143
Tableau 8 : Paramètres utilisés par la méthode GOD (suite).....	143
Tableau 9 : indices de vulnérabilité tel que réalisé par la méthode GOD.....	144
Tableau 10 : Paramètre profondeur à la nappe de la méthode développée en Idaho.....	145
Tableau 11 : paramètre recharge de la méthode élaborée en Idaho.....	145
Tableau 12 : paramètre sol de la méthode élaborée en Idaho.....	146
Tableau 13 : paramètres de la méthode de Denver.....	147
Tableau 14 : paramètres de la méthodes SCAM3.....	148
Tableau 15 : paramètres de la méthode SEEPPAGE.....	149
Tableau 16 : paramètres de la méthode de Sotornikova et Vrba.....	151
Tableau 17 : indices de vulnérabilité selon la méthode de Sotornikova et Vrba.....	151
Tableau 18 : paramètres de la méthode WISM.....	152
Tableau 19 : Paramètres de la méthode de Roeper.....	153
Tableau 20 : Facteurs impliqués dans l'estimation de la vulnérabilité (De Smedt, 1987).....	154
Tableau 21 : Classement des indices de vulnérabilité selon De Smedt.....	155
Tableau 22 : paramètres et classes associées selon la méthode développée au Kansas.....	159
Tableau 23 : Paramètre texture du sol de la méthode Minnesota.....	160
Tableau 24 : Classification des textures du sol selon l'Atlas du Minnesota.....	160
Tableau 25 : classification des formations selon la terminologie employée.....	162
Tableau 26 : Mise en place des indices de vulnérabilité du niveau 2.....	164
Tableau 27 : paramètres relatifs au niveau 3 de la méthode du Minnesota.....	165
Tableau 28 : propriétés du milieu utilisées pour l'élaboration de la méthode de Maxe et Johansson.....	170
Tableau 29 : méthodologie proposée pour l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines de la méthode de Maxe et Johansson.....	170
Tableau 30 : Propriétés physiques des textures.....	176
Tableau 31 : Composition des textures.....	176

1. Les méthodes de vulnérabilité

Voici le détail de quelques unes des méthodes de vulnérabilité existantes. Pour chacune sera spécifié (lorsque l'information sera disponible) le nombre de paramètres, la procédure à suivre, les résultats attendus. Des références seront également spécifiées.

1.1. Méthodes des systèmes paramétriques

1.1.1. Aquifer water vulnerability index/ South Dakota aquifer contamination vulnerability maps :

Références :

Lemme, Carlson, Dean et Khakural, 1989.

Plant science department-south dakota state university and united states department of agriculture, soil conservation service, brookings, SD 57007-001.

F. Aubre, Développement d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec, mémoire de maîtrise, école des gradués université Laval, faculté des sciences et génie, 1992.

Nombre de paramètres : 3

Procédure :

Som : Matière organique à la surface du sol, de 0 à 5 %.

St : Épaisseur du sol, de 0 à 1.5 pieds soit 0 à 46 cm.

Lpd : Perméabilité, de 0 à 20 pouces soit 0 à 50.8 cm, à la profondeur *d*, de 0 à 60 pieds soit de 0 à 18m.

Résultat :

Indice de vulnérabilité :

$$I = 2 - [(0.2666) * (Som) * (St)] + \sum_{d=0}^{18} 0.0067 * Lpd$$

La vulnérabilité augmente avec l'indice, ces indices de vulnérabilité sont regroupés en 4 degrés :

Tableau 1 : indice de vulnérabilité de la méthode du Dakota du sud.

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Vulnérabilité très faible	0 – 2.0
Vulnérabilité faible	2.1 – 6.0
Vulnérabilité moyenne	6.1 – 8.0
Vulnérabilité élevée	8.1 - 10

Références d'utilisation :

* G. Lemme, C. G. Carlson, R. Dean, B. Khakural, 1990, Contamination vulnerability indexes : a water quality planning tool.

* C. G. Carlson, R. Dean, G. Lemme, 1990, Prescription planning : an approach to nonpoint pollution problems :

(le but ici étant d'intégrer les caractéristiques physiques du sol et de la géologie inhérentes au milieu et les caractéristiques spécifiques des composés appliqués sur le territoire, afin de déterminer la vulnérabilité spécifique du milieu).

1.1.2. AVI**Références :**

D. Van Stempvoort, L. Ewert, L. Wassenaar, PPWB pilot project, Sept. 1991, Mars 1992, final report, 31 mars 1992, AVI: a method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canada.

Groundwater and contaminants project, environmental sciences division, national hydrology research institute, 11 innovation blvd, saskatoon, saskatchewan S7N 3H5.

Nombre de paramètres : 2**Procédure :**

Méthode basée sur deux paramètres :

d = épaisseur de chaque couche de sédiment au-dessus de l'aquifère saturé de surface. Un aquifère étant défini ici comme n'importe quelle unité d'au moins 0.6m ou de moins de 0.6m mais où au moins un puits est installé. Toute unité de plus de 0.6m plus profonde que 5m sous la surface est considérée comme saturée en eau.

K : conductivité hydraulique estimée de chacune de ces couches. Si les conductivités hydrauliques ne sont pas disponibles, elles peuvent être estimées (Cf. Tableau 2) en attendant les informations.

Tableau 2 : Conductivité hydraulique estimée pour divers matériaux des « Canadian Prairies ».

Type de sédiment	Code standard	Conductivité hydraulique
gravier	A	1000 m/d*
sable	B	10 m/d*
sable silteux	C	1 m/d*
silt	D	1.00E-01 m/d*
till fracturé, argile ou shale (0 à 5m de la surface)	E	1.00E-03 m/d**
till fracturé, argile ou shale (5 à 10m de la surface)	F	1.00E-04 m/d+
till fracturé, argile ou shale (> 10m de la surface mais basé sur la couleur: brun ou jaune)	F	1.00E-04 m/d+
till massif ou mix de sable-silt-argile	G	1.00E-05 m/d**
argile massive ou shale	H	1.00E-06 m/d*

Légende explicative :

* estimations basées sur Freeze et Cherry (1979)

** estimations basées sur Keller et al. (1988)

+ assume que les fractures diminuent vers le bas

Résultat :

Un facteur est calculé à partir des deux paramètres. Il s'agit de la résistance hydraulique :

$$C = \sum_{1}^{i} \frac{d_i}{K_i}$$

C'est un facteur théorique utilisé pour décrire la résistance d'un aquitard au flux vertical ((e.g. Kruseman et de Ridder, 1990), D. Van Stempvoort, L. Ewert, L. Wassenaar, 1992).

Ainsi le poids de chaque facteur est basé sur des théories physiques. Si la résistance hydraulique possède une dimension temps, qui dans le cas présent donne une approximation du temps de parcours de l'eau et des contaminants dans les couches de sédiments, il manque tout de même des facteurs tels que le gradient hydraulique, la diffusion et la sorption pour évaluer ce temps de parcours au sens stricte.

Les indices de vulnérabilité sont élaborés de la manière suivante :

Tableau 3 : Relation entre Indice de Vulnérabilité de l'Aquifère (AVI) et résistance hydraulique.

résistance hydraulique (C)	log (C)	vulnérabilité (AVI)
0 à 10 y	< 1	extrêmement fort
10 à 100 y	1 à 2	fort
100 à 1000 y	2 à 3	modéré
1000 à 10000 y	3 à 4	faible
> 10000 y	> 4	extrêmement faible

Les paramètres non pris en compte dans cette méthode incluent le climat, le gradient hydraulique, le flux horizontal, la porosité et le contenu en eau du milieu, et les propriétés de sorption et de réaction des couches. Ils peuvent être considérés pour des études spécifiques.

Références d'utilisation :

* K. Ronneseth, M. Wei, M. Gallo, publications 1995, solutions'95 IAH, Evaluating methods of aquifer vulnerability mapping for the prevention of groundwater contamination in British Columbia (Rq : utilisation de SURFER).

1.1.3. La méthode modifiée de Civita

Références :

Nombre de paramètres :

Procédure :

La particularité et l'intérêt de cette méthode c'est qu'elle permet d'inclure l'analyse de risque. Dans notre cas, elle n'a pas été incluse du fait qu'au départ l'objectif fixé est la détermination de la vulnérabilité intrinsèque. Par la suite il serait intéressant de déterminer ce que la carte de vulnérabilité implique au niveau du risque. C'est dans cette optique que cette méthode sera retenue dans cette étude.

Résultats :

Références d'utilisation :

1.1.4. DRASTIC

Références :

L. Aller, T. Bennett, J.H. Lehr, J.R. Petty (1985)

Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK 74820

Nombre de paramètres : 7**Procédure :**

Cette méthode a été conçue dans les années 80 par la Water-Well Association suite à la demande de l'EPA. L'objectif était de réaliser une méthode d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque applicable aux conditions hydrogéologiques rencontrées aux États-Unis.

La méthode DRASTIC prend en compte sept paramètres, chaque première lettre d'un paramètre constituant le nom de cette méthode :

D : profondeur à la nappe

R : recharge

A : type d'aquifère

S : type de sol

T : topographie

I : impact de la zone vadose

C : conductivité hydraulique

Estimation des 7 paramètres :

Tableau 4 : les 7 paramètres DRASTIC (Aller et al., 1987)

PROFONDEUR A LA NAPPE (m)		TYPE D'AQUIFERE			
Facteur multiplicatif (poids) = 5		Facteur multiplicatif (poids) = 3			
Intervalles des valeurs	Cotes	Intervalles des classes	Cotes	Cotes moy	
0 - 1,5	10	Shale massif	1 - 3	2	
1,5 - 4,5	9	Roche métamorphique ou ignée non-altérée	2 - 5	3	
4,5 - 9	7	Roche métamorphique ou ignée altérée ou fracturée till	3 - 5	4	
9 - 15	5	Séquence de grès, calcaire et shale	4 - 6	5	
15 - 23	3	Grès ou calcaire massif	5 - 9	6	
23 - 31	2	Sable et gravier	4 - 9	8	
> 31	1	Basalte	2 - 10	9	
		Calcaire karstique	9 - 10	10	
RECHARGE (cm/a)		TYPE DE SOL			
Facteur multiplicatif (poids) = 4		Facteur multiplicatif (poids) = 2			
Intervalles des valeurs	Cotes	Intervalles des classes	Cotes		
0 - 5	1	Mince ou absent; Gravier	10		
5 - 10	3	Sable	9		
10 - 18	6	Matériau organique (tourbe)	8		
18 - 25	8	Argile fissurée ou agglomérée	7		
> 250	9	Loam sableux	6		
		Loam	5		
		Loam limoneux	4		
		Loam argileux	3		
		Matériau organique (terre noire)	2		
		Argile intacte	1		
CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE (mV)		ZONE VADOSE			
Facteur multiplicatif (poids) = 3		Facteur multiplicatif (poids) = 5			
Intervalles des valeurs	Cotes	Intervalles des classes de la zone non saturée	Cotes	Cotes moy	
< 4	1	Aquifère confiné	1	1	
4 - 12	2	Silt/ argile	2 - 6	3	
12 - 29	4	Shale	2 - 5	3	
29 - 41	6	Calcaire	2 - 7	6	
41 - 81	8	Grès ou séquence de grès, calcaire et shale	4 - 8	6	
> 81	10	Sable & gravier à bonne proportion de limon & argile	4 - 8	6	
		Roche métamorphique ou ignée	2 - 8	4	
		Sable et gravier	6 - 9	8	
		Basalte	2 - 10	9	
		Calcaire karstique	8 - 10	10	
TOPOGRAPHIE					
Facteur multiplicatif (poids) = 1					
Topographie (%)	0 - 2	3 - 6	7 - 12	13 - 18	> 18
Cotes	10	9	5	3	1

Chacun des sept paramètres est affecté d'un facteur multiplicatif (D_p) qui va croissant de 1 à 5 selon l'importance du paramètre pour l'estimation de la vulnérabilité (ce poids est fixe pour chaque paramètre, mais change selon que l'on utilise DRASTIC ou pesticide DRASTIC).

(D) Le paramètre Profondeur à la nappe est coté comme un des deux plus important paramètres dans DRASTIC, avec une côte de 5 et les valeurs de référence sont 0 et 100 pieds.

(R) Le paramètre recharge présente une côte de 4 dans DRASTIC, et les valeurs de référence sont de 0 et 10 pouces.

(A) Le type d'aquifère présente une côte de 3.

(S) Le type de sol présente une côte de 2. Dans DRASTIC (EPA /600 2-87 035 1987) un inventaire des différents types de sol (selon la classification de Chart (*Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, 1951*)) avec les caractéristiques au niveau de l'augmentation du potentiel de contamination pour chacun.

(T) La topographie est l'un des paramètres le moins important de DRASTIC avec une côte de 1, le taux est à spécifier en fonction du pourcentage de pente dont les valeurs de référence sont 0 et 18%.

(I) L'impact de la zone vadose est l'autre paramètre le plus important pour le modèle DRASTIC, en effet une côte de 5 lui est attribué.

(C) La conductivité hydraulique a une côte de 3, les valeurs de références sont de 1 et 2000 gpd/pied.

(voir schémas récapitulatifs pour chaque paramètre en annexe 1)

Résultat :

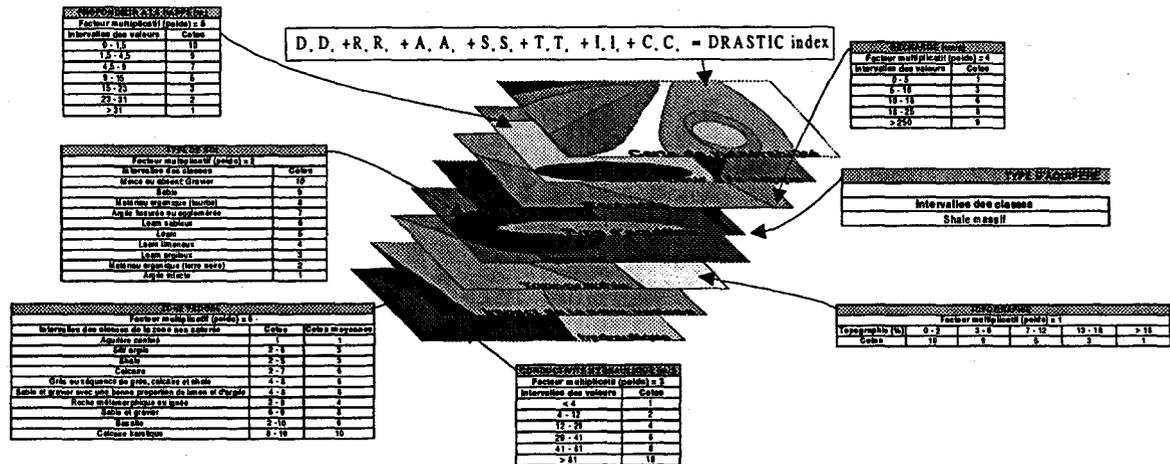


Figure 1 : Aperçu de la méthode DRASTIC.

Indice de vulnérabilité :

$$I = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W$$

La vulnérabilité augmente avec l'indice. A chaque paramètre est attribué une échelle comprenant des intervalles où une côte est attribuée selon la particularité du milieu, par exemple plus la profondeur à la nappe est grande plus la côte est faible. Il est possible d'utiliser cette méthode pour les aquifères confinés et les aquifères libres, mais, il faudra le faire séparément. La gamme possible de valeurs de vulnérabilité se retrouve entre 23 et 226 pour DRASTIC et 23 et 256 pour Pesticide DRASTIC. Les valeurs sont alors regroupées en 8 classes :

Tableau 5 : Classification des indices DRASTIC (Aller et al., 1987)

Intervalles	Indice DRASTIC
23 - 79	8
80 - 99	7
100 - 119	6
120 - 139	5
140 - 159	4
160 - 179	3
180 - 199	2
200 - 226	1

☛ *Remarque :*

Mc Cormack (1986) a proposé l'échelle :

Tableau 6 : Classification des indices DRASTIC selon Mc Cormack (1986).

Intervalles	Degré de vulnérabilité
23 - 100	Faible vulnérabilité
100 - 150	Vulnérabilité modérée
150 - 226	Vulnérabilité élevée

Références d'utilisation :

* K.C.S. Navulur, B.S. Cooper and B.A. Engel, 1995, présenté à la conférence internationale d'été de 1995 de l'ASAE à Chicago, [http://pasture.ecn.purdue ...papers/ASAE95/asae1.html](http://pasture.ecn.purdue...papers/ASAE95/asae1.html), groundwater vulnerability evaluation to nitrate and pesticide pollution on a regional scale using GIS.

* Voir le tableau 5 du chapitre 2.

1.1.5. GOD

Références :

Foster (1987)

R. Hirata, Departamento de geologica economica; instituto de geociencias-USP. Cx postal 11348. CEP 05422-970, Sao Paulo (SP). Brasil.

Nombre de paramètres : 4

Procédure :

Elle a été conçue en Angleterre en 1987 par Foster.

L'appellation de la méthode provient d'un acronyme : *Groundwater occurrence* (type d'aquifère) *Overall aquifer class* (caractéristiques de l'aquifère en terme de lithologie et porosité) *Depth to water table* (profondeur à la nappe).

Les éléments nécessaires pour le schéma de protection des eaux souterraines et pour la classification de la vulnérabilité des aquifères sont : le type de sol, les formations géologiques, la lithologie des lits confinants de la zone non saturée, la profondeur à la nappe.

Tableau 7 : Paramètres utilisés par la méthode GOD.

Type d'aquifère	Côte
aucun aquifère	0
aquifère confiné et artésien	0.1
aquifère confiné et artésien	0.2
aquifère semi-confiné	0.3
aquifère avec couverture de surface	0.4 - 0.6
aquifère non confiné	0.7 - 1

lithologie de l'aquitard ou de l'aquiperme	côte
sol résiduel	0.4
limon alluvial; loess; shale; calcaire fin	0.5
sable éolien; siltite; tuf; roche ignée et métamorphique fracturée	0.6
sable et gravier; grès; tuf	0.7
gravier (colluvion)	0.8
calcaire	0.9
calcaire fracturé ou karstique	1

Tableau 8 : Paramètres utilisés par la méthode GOD (suite).

PROFONDEUR A LA NAPPE							
Profondeur (m)	0 - 2	2 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 50	50 - 100	> 100
Côte	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4

Résultat :

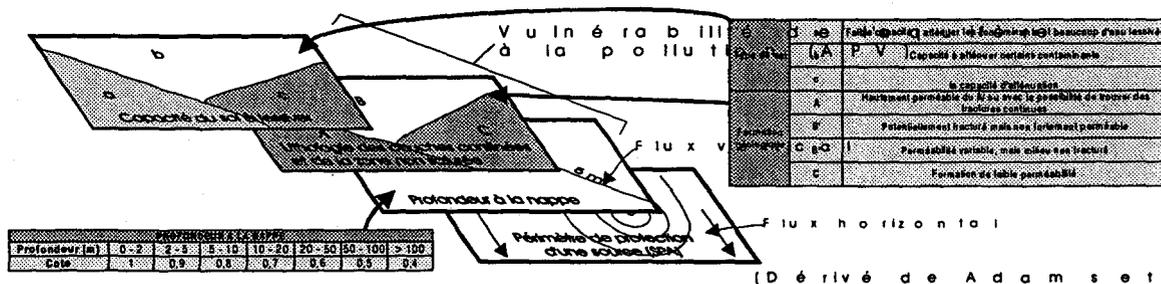


Figure 2 : Aperçu de la méthode GOD.

Indice de vulnérabilité :

$$I = C_A * C_L * C_D$$

La vulnérabilité augmente avec l'indice, la classification (en 5 classes) effectuée à partir de ces indices est la suivante :

Tableau 9 : indices de vulnérabilité tel que réalisé par la méthode GOD.

Indice de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité	Définition du degré
0	aucune vulnérabilité	
0 - 0.1	vulnérabilité négligeable	couches confinantes présentes sans écoulement vertical significatif
0.1 - 0.3	faible vulnérabilité	seulement vulnérable à long terme aux polluants conservateurs lorsque la décharge se fait en continu
0.3 - 0.5	vulnérabilité modérée	vulnérable à certains polluants mais seulement lorsque la décharge est continue
0.5 - 0.7	vulnérabilité élevée	vulnérable à beaucoup de polluants excepté ceux hautement absorbés ou transformés
0.7 - 1	vulnérabilité extrême	vulnérable à beaucoup de polluants de l'eau avec un impact rapide sur la pollution

Références d'utilisation :

* S.S.D. Foster, British Geological Survey, 1998. Groundwater recharge and pollution vulnerability of British Aquifers : a critical overview.

* Instituto geologico, departamento de aguas e energia eletrica, sao Paulo, 1997. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluicao das aguas subterraneas no estado de sao paulo, volume I et II.

1.1.6. Idaho's groundwater vulnerability project :

Références :

M. Rupert, Dace T., Maupin M., Wicherski B.

Idaho department of health and welfare division of environmental quality 1410 N. Hilton, Statehouse Mail, Boise, 83720-9000.

Nombre de paramètres : 3

Procédure :

Cette méthode utilise le système de cotation de Agricultural DRASTIC modifié. Ces modifications incluent : 1) une grande quantité d'information sur la profondeur des puits, 2) information sur les sols plus détaillée, 3) incorporation de l'irrigation comme contribution à la recharge de la nappe, 4) élimination de la topographie en tant que facteur, et 5) division des facteurs caractéristiques du sol en 4 sous-facteurs.

Les paramètres pris en compte sont le sol, la zone vadose et la zone saturée :

Paramètre profondeur à la nappe :

Tableau 10 : Paramètre profondeur à la nappe de la méthode développée en Idaho.

Profondeur	Poids
1 à 25 pieds	50
26 à 50 pieds	35
51 à 100 pieds	20
101 à 250 pieds	10
> 250 pieds	1

Paramètre obtenu en soustrayant la valeur de surface du sol à la valeur de surface de la nappe estimée par Krigeage.

Pas de distinction effectuée, qu'il s'agisse d'une nappe perchée, d'un aquifère profond ou autre.

Paramètre recharge :

• **Tableau 11 : paramètre recharge de la méthode élaborée en Idaho.**

Classes de recharge	Pondération
Irrigation des terres par gravité	50
Zones riveraines	50
Terrains irrigués par rampes d'arrosage	40
Forêts	30
Agriculture de terres arides	20
Prairies	20
Roche à nu (coulée de lave)	10
Zones urbaines	Sans poids
Eau de surface	Sans poids

Ce paramètre combine trois informations :

Une première couche d'information soulignant la présence de terre de culture irriguées ou sèches.

Une seconde couche soulignant la différence entre l'irrigation par gravité et l'irrigation par rampe d'arrosage.

Une troisième couche ayant rapport à l'utilisation du sol, divisé en 5 catégories.

Paramètre sol :

Tableau 12 : paramètre sol de la méthode élaborée en Idaho.

propriété	Cote
Perméabilité de la plus restrictive des couches	2 à 20
Profondeur à la nappe dans l'horizon de sol	1 à 10
Profondeur au bedrock	0 ou 8
Fréquence d'irrigation	0 à 5
<u>Total</u> :	2 à 43

Il s'agit de 4 caractéristiques du sol.

Le score de chaque type de sol est multiplié par 3 pour déterminer l'indice de susceptibilité final.

Résultat :

Indice de vulnérabilité.

La carte de vulnérabilité est réalisée en combinant les 3 informations précédentes, les indices sont ajoutés pour créer un indice de vulnérabilité final. La carte de vulnérabilité est découpée en 4 catégories de vulnérabilité relative : Low (30%), Moderate (30%), High (30%), Very High (10%). Découpage effectué d'après un graphique indice de vulnérabilité versus les acres de terrains.

Référence d'utilisation :

- * EPA, 1993. A review of methods for assessing aquifer sensitivity and ground water vulnerability to pesticides contamination.
- * Idaho Department of Health and Welfare, Division of Environmental Quality, avril 1991, Groundwater vulnerability assessment snake river plain, southern Idaho.

1.1.7. Greater Denver ground water sensitivity assessment :

Références :

G. Hearne, M. Wireman, A. Campbell, S. Turner, G. Ingersoll
United states geological survey water resources division, federal center Denver, CO 80225.

Nombre de paramètres :

Procédure :

La géologie, la profondeur à la nappe, le sol et les informations sur l'élévation doivent produire des cartes à 7 facteurs hydrogéologiques. Les informations de ces cartes sont stockées dans un SIG pour produire des cartes de représentation de la sensibilité de l'aquifère le plus haut. Chaque carte de sensibilité est décrite en terme quantitatif.

Les paramètres pris en compte dans cette méthode sont, sachant que les zones hydrogéologiques concernées sont le sol, la zone vadose et la zone saturée :

Tableau 13 : paramètres de la méthode de Denver.

Paramètres
Profondeur à la nappe
Conductivité hydraulique
Recharge de l'aquifère
Pente de la surface de la région
Sol
Zone vadose

Résultat :

Indice de vulnérabilité.

Référence d'utilisation :

* EPA, 1993. A review of methods for assessing aquifer sensitivity and ground water vulnerability to pesticides contamination.

1.1.8. SCAM3 (soil contaminant Attenuation Model) :**Références :**

Zaporozec. 1985.

Sutherland and Madison, 1987.

Nombre de paramètres : 7**Procédure :**

SCAM3 est la troisième version de SCAM.

Évalue la capacité des différents types de sol cartographiable à atténuer le mouvement des contaminants introduits à la surface, en se basant sur 7 caractéristiques physiques et chimiques des sols.

Les paramètres utilisés sont les suivants :

Tableau 14 : paramètres de la méthodes SCAM3.

Paramètre	Descriptif
<i>T_a</i>	Texture de l'horizon A de surface
<i>T_b</i>	Texture de l'horizon B du sous-sol. C'est la texture la plus fine du matériel qui dépasse 30% de l'épaisseur totale de l'horizon B. Si une des textures ne dépasse pas 30%, la texture du sous-sol est la couche dont la texture affecte le potentiel de contamination de la manière la plus significative
<i>pH</i>	pH de l'horizon de surface
<i>D</i>	la profondeur du sol altéré (altération du niveau A et B) est la profondeur de la surface au sommet des horizons C ou R qui viennent en premier. Pour les sols de distinction b, la profondeur des sols est la distance de la surface au fond des horizons 2O, Ab, Bb, Eb ou le sommet de l'horizon Cb qui est plus profond etc pour les entisols, les histosols, les sols érodés, les sols très érodés.
<i>Dr</i>	classe de drainage de sol réfère à la fréquence et la durée des périodes de saturation ou aux saturation partielles qui existent pendant le développement des sols (Glocker et Patzer, 1978).
<i>P</i>	perméabilité des horizons du sous-sol par une cote si la description des séries de sol indiquent que le roc est trouvé en dedans de 20 pouces à partir de la surface, ou si le roc est présent dans l'unité de sol cartographiée en dedans des 40 pouces de la surface. La perméabilité du sous-sol est déterminée à partir de la classe de taille de particules.
<i>O</i>	contenu en matière organique de l'horizon de surface ou de 0 à 6 pouces de profondeur à partir de la surface.

Résultat :

Indice de potentiel de contamination :

$$I = T_{aR} + T_{bR} + pH_R + D_R + D_{rR} + P_R + O_R$$

R étant la cote attribuée à chaque paramètre.

Référence d'utilisation :

- * A. Zaporozec, 1985, Wisconsin geological and natural history survey special report 8, p. 34-36. Groundwater protection principles and alternatives for rocks county, wisconsin.
- * M.S. Bridson, M.F. Bohn, F.W. Madison, 1994, Wisconsin geological and natural history survey, open file report 94-03. Evaluation of groundwater susceptibility assessment systems in Dane County, Wisconsin : explication et comparaison de différentes méthodes.

1.1.9. SEEPPAGE (System for Early Evaluation of the Pollution Potential of Agricultural Groundwater Environments)

Références :

J.S. Moore, 1988.

United States Department of Agricultural Soil Conservation Service, Northeast National Technical Center, Chester, PA 19013.

Nombre de paramètres : 7**Procédure :**

Les 7 paramètres utilisés par ce système ont été sélectionnés, en premier lieu, pour leur facilité d'utilisation, alors que les informations non disponibles ou non développées facilement n'ont pas été considérées dans le système (Moore, 1989). SEEPPAGE est en partie une combinaison des paramètres sélectionnés des systèmes DRASTIC et SCAM (M.S. Bridson, M.F. Bohn, F.W. Madison, 1994).

L'indice final de cette méthode peut être calculé de deux manières différentes. L'information utilisée pour les paramètres est la même, mais le poids affecté à chaque paramètre varie selon que la source de pollution soit ponctuelle (venant d'un site spécifique) ou diffuse (moore 1989, et M.S. Bridson, M.F. Bohn, F.W. Madison, 1994).

Les paramètres sont :

Tableau 15 : paramètres de la méthode SEEPPAGE.

Paramètre	Explication
<i>D</i>	Distance entre le site et le point d'utilisation de l'eau (pieds) est la distance horizontale entre le site et le point d'utilisation de l'eau ou le point concerné comme ligne de propriété.
<i>L</i>	Pente du terrain qui est la pente de la surface du terrain au niveau du site en pourcentage
<i>W</i>	Profondeur de la nappe (pieds) déterminée en estimant la profondeur la plus haute de la nappe qui est sous l'élévation de la base du site plus de 5% de l'année
<i>V</i>	Matériel de la zone vadose (lithologie) définit comme matériel non saturé ou non saturé discontinue qui se trouve au-dessus du niveau de la nappe et sous la surface du sol
<i>A</i>	matériel de l'aquifère (lithologie) définit comme le matériel géologique saturé qui fournira une quantité suffisante d'eau
<i>Sd</i>	Profondeur du sol (pouces)
<i>At</i>	Potentiel d'atténuation des sols cotés, basé sur les indices numériques de 6 caractéristiques physiques et chimiques des sols pour chaque unité de sol cartographiable. Ces caractéristiques incluent: (Ta) la texture de l'horizon de surface A, (Tb) la texture du sous-sol, (pH) le pH de l'horizon de surface, (O) le contenu en matière organique de la couche de surface du sols minéral, (P) la perméabilité du dernier horizon perméable dans le profil (sous l'horizon A), et (Dr) la classe de drainage des sols.

Résultat :

Indice numérique de potentiel de contamination :

$$I = D_R D_W + L_R L_W + W_R W_W + V_R V_W + A_R A_W + Sd_R Sd_W + At_R At_W$$

R étant la cote affectée à chaque paramètre par rapport aux cotes possible pour chaque paramètre.

W étant le poids de chaque paramètre (facteur multiplicatif).

La détermination de l'indice du potentiel d'atténuation des sols A_{tR} est déterminé à partir des 6 caractéristiques physiques et chimiques des sols (définies dans le tableau ci-dessus) de la manière suivante :

$$A_{tR} = T_{aR} + T_{bR} + pH_{R} + O_{R} + P_{R} + D_{tR}$$

Références d'utilisation :

- * J.S. Moore, 1989, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Geology Technical Note No. 5, 23 p. SEEPPAGE : A System for Early Evaluation of the Pollution Potential of Agricultural Groundwater Environments.
- * M.S. Bridson, M.F. Bohn, F.W. Madison, 1994, Wisconsin geological and natural history survey, open file report 94-03. Evaluation of groundwater susceptibility assessment systems in Dane County, Wisconsin : explication et comparaison de différentes méthodes.
- * K.C.S. Navulur, B.S. Cooper and B.A. Engel, 1995, présenté à la conférence internationale d'été de 1995 de l'ASAE à Chicago, [http://pasture.ecn.purdue ...papers/ASAE95/asae1.html](http://pasture.ecn.purdue...papers/ASAE95/asae1.html), groundwater vulnerability evaluation to nitrate and pesticide pollution on a regional scale using GIS.

1.1.10. SOTORNIKOVA ET VRBA

Références :

F. Aubre, Développement d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec, mémoire de maîtrise, école des gradués université Laval, faculté des sciences et génie, 1992.

Nombre de paramètres : 4

Procédure :

Tableau 16 : paramètres de la méthode de Sotornikova et Vrba.

Conductivité Hydraulique des matériaux de surface (K)			
K (m/s)	> 2.30E-07	2.30E-07 à 5.70E-08	< 5.70E-08
Cote	15	10	5

Épaisseur de la zone non saturée			
Épaisseur (m)	0 - 5	5 - 20	> 20
Cote	15	10	5

Fluctuation annuelle de la nappe			
Fluctuation (m)	0 - 2	0 - 4	> 4
Cote	15	10	5

Transmissivité de l'aquifère (T)			
T (m ² /d)	0.001	0.001 à 0.0001	< 0.0001
Cote	15	10	5

Résultat :

Indice de vulnérabilité;

$$I = C_c + C_i + C_F + C_T$$

La vulnérabilité augmente avec l'indice et 3 degrés de vulnérabilité sont déterminés :

Tableau 17 : indices de vulnérabilité selon la méthode de Sotornikova et Vrba.

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Vulnérabilité élevée	50 - 60
Vulnérabilité moyenne	35 - 45
Faible vulnérabilité	20 - 30

Références d'utilisation:

* R. Sotornikova, J. Vrba, Stavebni geologie, Prague, Some remarks on the concept of vulnerability maps : Ils recommandent notamment de baser la conception de cartes de vulnérabilité sur les cartes hydrogéologiques.

1.1.11. WISM (Wisconsin Susceptibility Model)**Références :**

Schmidt, 1987.

Nombre de paramètres : 4

Procédure :

Cette méthode est utilisée pour élaborer des cartes à l'échelle du 1 :1000000. Les ressources caractéristiques sont sélectionnées selon leur importance dans le contrôle du mouvement de l'eau vers la nappe ou selon leur disponibilité dans la cartographie à l'échelle de l'état.

Les paramètres utilisés sont :

Tableau 18 : paramètres de la méthode WISM.

Paramètre	descriptif
S	les caractéristiques du sol sont évaluées en assignant chaque association de sol à l'une des 4 catégories basées sur la perméabilité, la texture, la capacité de rétention de l'eau des 5 premiers pieds de matériaux. Les poids sont basés sur les caractéristiques des sols prédominants dans l'association, en donnant peu de considération aux sols minoritaires.
Sd	les dépôts de surface (texture) sont les matériaux non consolidés entre le sol et le toit du roc. Les dépôts de surface primitifs représentent le sommet des matériaux non lités entre la couche de sol et le roc, jusqu'à ce que plus d'informations soient collectées sur les dépôts peu profonds.
W	la profondeur à la nappe (pieds) c'est la distance entre la surface du terrain et le niveau de la nappe.
T	le type de roc (lithologie) est le matériel consolidé qui se trouve sous le sol et les dépôts de surface.

Résultat :

Indice numérique pour le potentiel de contamination :

$$I = S_R S_W + S_d R S_d W + W_R W_W + T_R T_W$$

R étant l'indice numérique pour chaque type de paramètre.

W étant le poids de chaque paramètre. Il est basé sur la profondeur au roc.

Selon l'application de la méthode, on parle de WISM-ST (on se réfère dans ce cas à l'état) ou de WISM-CO (on se réfère dans ce cas au conté).

Références d'utilisation :

* R.R. Schmidt, 1987, Wisconsin department of natural resources, bureau of water resources management, PUBL-WR-177-87, 27p. with 1 :1100000 scale map. Wgroundwater management plan- Report 5- Groundwater contamination susceptibility in Wisconsin.

* M.S. Bridson, M.F. Bohn, F.W. Madison, 1994, Wisconsin geological and natural history survey, open file report 94-03. Evaluation of groundwater susceptibility assessment systems in Dane County, Wisconsin : explication et comparaison de différentes méthodes.

1.1.12. La méthode Roeper

Références :

Roeper, 1990

D. Van Stempvoort, L. Ewert, L. Wassenaar, PPWB pilot project, sept 1991, mars 1992, AVI :
A method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canada.

Nombre de paramètres : 1

Procédure :

Tableau 19 : Paramètres de la méthode de Roeper

Paramètre	Poids
Profondeur de la couverture protectrice au-dessus de l'aquifère principal.	100%

La subdivision des intervalles d'épaisseur pour définir les zones de vulnérabilité est arbitraire :

0 à 5m, 5 à 10m, > 10m.

Seuls les aquifères principaux sont pris en compte.

Le rôle de la zone vadose et le type de l'aquifère ne sont pas pris en considération.

Résultat :

Carte de vulnérabilité à 3 indices.

1.2. Méthodes contextuelles

1.2.1. Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en Belgique

Références :

P. De Smedt, National Water Supply Company, Brussels, Belgium.

W. De Breuck, W. Loy, T. Van Autenboer, E. Van Dijck, 1987, Groundwater Vulnerability maps.

Nombre de paramètres : 5 (statiques et dynamiques) + 4 aspects de la contamination à prendre en compte.

Procédure :

Tableau 20 : Facteurs impliqués dans l'estimation de la vulnérabilité (De Smedt, 1987)

Facteurs statiques et dynamiques	Aspects de la contamination à prendre en compte
Dimension et nature de l'aquifère et formations de couverture	
Propriétés hydrauliques des formations	
Comportement des eaux souterraines en milieu naturel et artificiel	
Interactions entre formations adjacentes	
Nature et étendue de la contamination	
	Introduction de l'écoulement vertical des contaminants avec l'eau infiltrée ou le fluide contaminant de la surface vers la zone saturée en passant par le sol et la zone non saturée.
	Distribution de la contamination par l'écoulement de l'eau souterraine contaminée dans les conditions hydrogéologiques actuelles.
	La persistance de la contamination après la disparition de la source de contamination en considérant la recharge et la nature des formations et la composition du contaminant.
	Interactions entre les contaminants et la formation.

La réalisation de la carte peut se schématiser de la manière suivante :

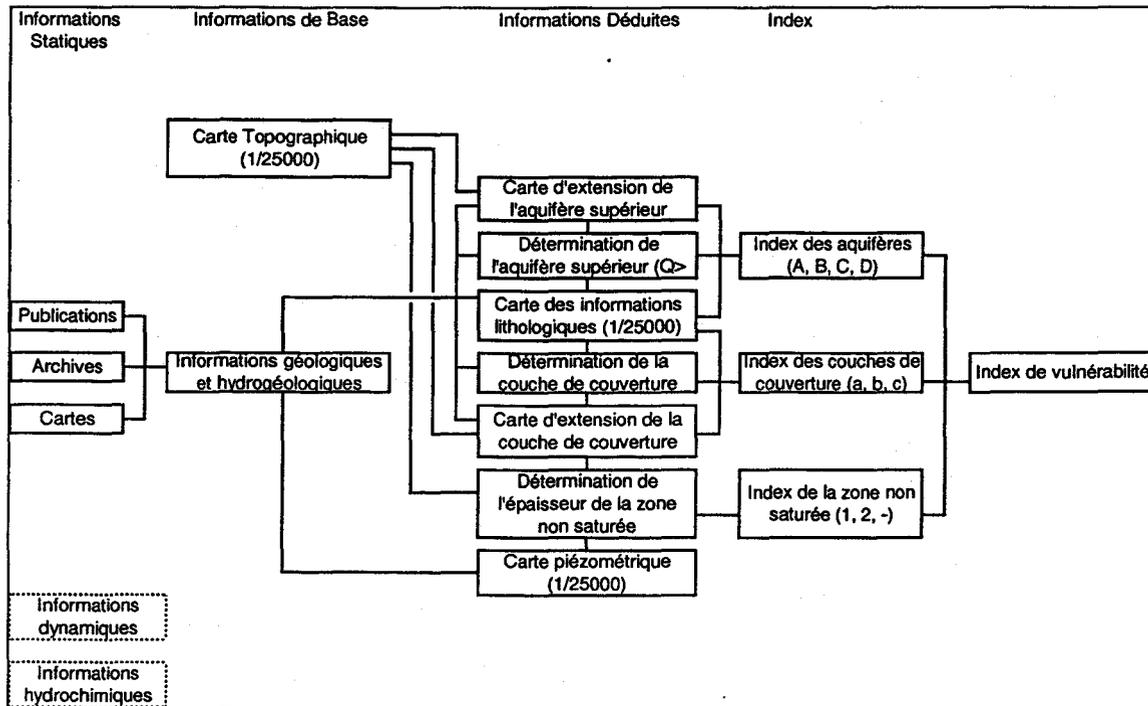


Figure 3 : Organigramme de la méthode de cartographie de la vulnérabilité d'après De Smedt (1987)

Légende :**- Aquifère :**

A : Chalk, limestone, sandstone, marl.

B : gravier

C : sable

D : sable loameux, sable argileux.

- Formation de couverture :

a : pas de formation de couverture

b : formations loameuses

c : formations argileuses

- la zone non saturée :

(1) moins de 10 m d'épaisseur.

(2) plus de 10 m d'épaisseur.

Résultat :**- Échelle de vulnérabilité :****Tableau 21 : Classement des indices de vulnérabilité selon De Smedt.**

Degré	Indices	Aquifère	Couche de couverture	Zone non saturée
1. Extrêmement vulnérable	Aa1	chalk, limestone, sandstone, marl	< 5m ou sableux	<= 10m
	Ba1	graviers	< 5m ou sableux	<= 10m
2. Très vulnérable	Aa2	chalk, limestone, sandstone, marl	< 5m ou sableux	> 10m
	Ba2	graviers	< 5m ou sableux	> 10m
	Ca1	sable	< 5m ou sableux	<= 10m
3. Vulnérable	Ab	chalk, limestone, sandstone, marl	loameux	
	Bb	graviers	loameux	
	Ca2	sable	< 5m ou sableux	> 10m
	Ac	chalk, limestone, sandstone, marl	argileux	
4. Modérément vulnérable	Bc	graviers		
	Cb	sable	loameux	
	Da1	sable loameux ou argileux	< 5m ou sableux	< 10m
	Da2	sable loameux ou argileux	< 5m ou sableux	> 10m
	Cc	sable	argileux	
5. Peu vulnérable	Db	sable loameux ou argileux	loameux	
	Dc	sable loameux ou argileux	argileux	

La carte de vulnérabilité, réalisée au 1/100000, peut être définie comme une carte montrant le degré de risque de contamination des eaux souterraines dans les aquifères supérieurs, par des contaminants qui s'infiltrent de la surface.

Références d'utilisation :

* P. De Smedt, W. De Breuck, W. Loy, T. Van Autenboer, E. Van Dijck, Aqua No 5, pp 264 à 267, 1987, Groundwater Vulnerability Maps.

1.2.2. Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

Références :

J. Margat, 1970 et 1991

MF Parascandola, 1980, Université des sciences et techniques du Languedoc - Académie de Montpellier.

Nombre de paramètres : Autant que nécessaire et disponible à une bonne estimation de la vulnérabilité. . Mais dans le cas de la France 6 catégories primaires et 9 catégories secondaires ont été définies. Pour chaque catégorie la perméabilité et la vitesse de l'eau souterraine sont définies.

Procédure :

Selon l'échelle de réalisation de la carte (1/1000000, 1/250000, 1/50000 dans le cas de la France), on obtient des cartes d'utilisation variables.

1- les cartes à petite échelle donnent une vue générale des paramètres de vulnérabilité. Cela permet de montrer les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans les terrains d'où sont issues les sources du territoire.

Les principes de bases de ce type de carte sont : tout d'abord il faut considérer l'introduction de la pollution (transit selon un trajet surtout vertical de corps polluants entraînés par les eaux d'infiltration ou de fluides polluants depuis la surface du sol jusqu'à une nappe souterraine à travers la zone non saturée), la propagation de la pollution (écoulement de l'eau polluée, entraînée par le mouvement naturel de la nappe atteinte), la persistance plus ou moins prolongée (après interruption de la cause initiale de la pollution) ; puis en se basant sur ces principes, il faut réaliser des classes de terrain selon la nature géologique du sous-sol, la

profondeur de la surface libre des nappes par rapport au sol et sur les modalités de drainage des nappes par les cours d'eau, la densité du réseau hydrographique permanent commandant l'extension des écoulements souterrains.

Si il est possible d'exprimer des idées, sur la vulnérabilité, d'ordre générale avec des cartes à petites échelles, il est possible d'exprimer des idées plus précises à l'aide d'une cartographie à plus petite échelle, ainsi :

2- les cartes à moyenne échelle donnent une vue plus détaillée de ces paramètres.

3- les cartes à grande échelle sont un préalable aux études quantitatives détaillées que nécessite l'aménagement de zones industrielles ou urbaines et la délimitation des périmètres de protection.

La démarche utilisée pour la réalisation de telles cartes est la même que pour les cartes à petite échelle (avec en plus des informations plus précises comme des indications stratigraphiques simples etc...). La différence réside dans l'ajout d'informations supplémentaires relatives à l'utilisation du territoire. Ces cartes sont donc plus de type carte de risques.

Pour chaque échelle une légende type est définie, mais la base de référence reste celle de la carte de plus petite échelle.

Résultat :

1- Les cartes de plus faible échelle, présentent une vue d'ensemble des moyens de défenses naturels des nappes contre la pollution, mettant en évidence les zones sensibles du territoire (à des fins d'enseignement et de sensibilisation au problèmes de l'eau).

Dans le cas de la carte de France, six classes ont été réalisées : le domaine des alluvions (légende en rouge), terrains dans lesquels la pollution se propage très rapidement (calcaires, dolomies : domaine karstique) (légende en rouge), terrains dans lesquels la pollution se propage rapidement (craie, calcaires, dolomies, basaltes) (légende en orangé), terrains dans lesquels la pollution se propage plus lentement (sables, grès, projections volcaniques) (légende en jaune), terrains dans lesquels la pollution se propage de façon très variable (domaines composites à alternance rapides en affleurement de terrains sédimentaires perméables et peu perméables ou terrains peu homogènes à perméabilité diverse tels que les moraines) (légende en vert et orange (hachures)), et enfin terrains dans lesquels la pollution n'affecte en pratique que les eaux de surface (légende en bleu et vert). Les nappes libres certaines précisions sont apportées : en bleu ou noir, les principales zones où la surface piézométrique prend la forme d'un «dôme», les zones où les nappes sont essentiellement alimentées par des irrigations provenant de prélèvements dans un cours d'eau de surface, les zones à nappe libre protégées partiellement en

surface par un terrain peu perméable; par des points rouges, les points de perte totale ou partielle de cours d'eau de surface qui constituent des origines de pollution directes des eaux souterraines par les eaux de surface.

2- et 3- Dans le cas de la carte de France, le nombre de classes et la dénomination sont les mêmes que pour les cartes à petite échelle, avec quelques indications supplémentaires parmi lesquelles : pour les cartes au 1/250000, la présence de grottes, les limites de partage des eaux, zones où la pression de la première nappe libre rencontrée est supérieure à celle de la nappe sous-jacente, sens de propagation d'une pollution éventuelle, zones inondables, puits de mines, cours d'eau drainant, cours d'eau perché par rapport au niveau piézométrique des eaux souterraines locales ; et pour les cartes au 1/50000, zones de captage, périmètre d'appel de pompes en période d'étiage, zones d'habitation, égouts, dépôts d'ordures, cimetière, dépôts d'essence, usines, raffinerie, laiteries, sablières, stations de traitement des eaux.

Références d'utilisation :

* M. Albinet, J. Margat, 1970, bulletin du BRGM, section III, No 4, p 13-22, Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine.

* Thèse de MF Parascandola, 1980, Université des sciences et techniques du Languedoc – Académie de Montpellier (Jury : C. Drogue, M. Albinet, JC Grillot, J. Margat, D. Rousselot), Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution - Essai de représentation cartographique.

1.2.3. Leachability classes of Kansas soils :

Références :

D.E. Kissel, O.W. Bidwell, J.F Kientz

Kansas State University, Kansas Agricultural Station, Manhattan, KS 66502

Nombre de paramètres : 2

Procédure :

Cette méthode permet de regrouper les sols du Kansas en 4 classes de susceptibilité. La susceptibilité est basée sur la texture des profils de sol et le taux d'infiltration de l'eau (perméabilité).

Tableau 22 : paramètres et classes associées selon la méthode développée au Kansas.

Classe	Texture du sol	Perméabilité du sol
1	Sable, sable fin, sable grossier et sable grossier loameux	6 à 20 pouces/heure
2	sable fin loameux, loam sableux grossier, et loam sableux	2 à 6 pouces/heure
3	loam, loam sableux très fin, loam silteux et loam sableux fin	0.6 à 2 pouces/heure
4	loam argileux, loam argileux silteux, argile silteuse, argile sableuse et argile	< 0.6 pouces/heure

Résultat :

Carte de vulnérabilité.

Référence d'utilisation :

* D.E. Kissel, O.W. Bidwell, J.F. Kientz, 1982. Leaching Classes of Kansas Soils. Kansas State University, Kansas Agricultural Experiment Station, Manhattan, Kansas, Bulletin 641, 10pp.

1.2.4. Minnesota's geologic sensitivity methods/ Assessing Geologic Sensitivity of Ground water Resources in Minnesota.

Références :

F. Bergsrud, J. Falteisek, J. Green, J. Hines, H. Hobbs, E. Mohring, B. Olsen, J. Piegat, E. Porcher, C. Schenk, 1991
Department of Minnesota Natural Resources, Division of Waters.

Nombre de paramètres : 4**Procédure :**

Méthode utilisant 3 niveaux de cartographie pour estimer la vulnérabilité.

Paramètres utilisés :

Explication niveau 1 :

Une estimation de niveau 1 utilise les cartes existantes et assume que le matériel géologique sur ou proche de la surface est représentatif de la zone vadose entière (ce qui est faux dans la plupart des cas). Aucune nouvelle donnée n'est récoltée.

Les valeurs de classes sont basées sur l'estimation de la perméabilité des milieux géologiques et la profondeur à la nappe. On assume également que la zone vadose est à moins de 6 pieds tant que d'autres informations ne sont pas disponibles.

Évaluation générale : le temps de parcours est relatif à la perméabilité des matériaux dans la zone vadose et la profondeur à la nappe.

Les deux types de cartes les plus communément utilisées pour la réalisation des cartes de ce niveau, sont la carte géologique à grande échelle et l'étude des sols.

Si la carte utilisée est la carte géologique, on obtient alors des classes comme suit :

Tableau 23 : Paramètre texture du sol de la méthode Minnesota

Matériel Géologique	taux de sensibilité	
	profondeur à la nappe	
	< 6 pieds	> 6 pieds
<i>Dépôts non consolidés</i>		
outwash, sable & gravier glacio lacustre	Très fort	Très fort
sable de terrasse & dépôts graveleux	Très fort	Très fort
matériel organique, tourbes	Fort	Modéré
loess, dépôts glacio lacustre et terrasse de silt & sable fin	Fort	Fort
till sableux loameux, till loameux sableux	Fort	Modéré
alluvion, colluvion	Fort	Modéré
till loameux, till loameux argileux, till argileux	Modéré	Faible
argiles glacio lacustre & argiles silteuses	Modéré	Faible
<i>roc ou résidu de roc</i>		
calcaire, dolomie	Très fort	Très fort
sable	Très fort	Fort
roches ignées et métamorphiques	Fort	Fort
silt	Modéré	Modéré
schiste	Faible	Faible

Si c'est l'étude des sols qui sert de base à la réalisation des cartes, alors on se basera sur les textures de sol, soit (en utilisant l'atlas des sols du Minnesota) :

Tableau 24 : Classification des textures du sol selon l'Atlas du Minnesota.

Drainage	Texture du sol de 0 à 5 pieds		
	sableux	loameux	argileux
Faiblement drainé	Très fort	Fort	Modéré
Bien drainé	Fort	Modéré	Faible

La profondeur de l'eau indiquée dans les études de sol donnent la profondeur minimale du matériel saturé pendant certaines portions de l'année. Dans la plupart des cas, cela ne reflète pas le niveau de la nappe.

L'étude des sols est utilisée pour préparer une carte géologique, mais si c'est possible, la carte de géologie de surface serait plus appropriée.

Explication niveau 2 :

Déterminer soit à partir de cartes de quaternaire soit à partir de puits de forage, les zones de faibles ou moyenne perméabilité, la profondeur à la nappe, le type de matériau de l'aquifère.

Inclus tous les matériaux (consolidé comme non consolidé) de la surface à la nappe.

Le temps de parcours dépend de l'évaluation du mouvement vertical vers le bas (contrôlé par la perméabilité verticale) et de l'épaisseur de la zone vadose.

La perméabilité est influencée par : la texture du matériel, la présence de fractures.

Ce niveau 2 peut être complété de deux manières : la méthode par point ou la méthode par surface.

La méthode des points utilise des informations de subsurface provenant de points spécifiques.

La méthode des surfaces demande une carte de géologie de surface (ou l'équivalent) très détaillée.

L'estimation de niveau 2 est plus précise que celle de niveau 1 car elle considère la variabilité du matériel géologique.

Les processus complexes du matériel insaturé tels que le comportement de l'eau infiltrée, l'évaporation, la végétation, les conditions d'humidité préexistantes, etc... ne sont pas pris en compte lors de cette estimation.

Procédure générale (méthode des points) :

Les incertitudes introduites par l'utilisation de cette méthode doivent être prises en compte.

Étape 1 : Collecte des informations hydrogéologiques disponibles.

Étape 2 : Organisation des informations. Les informations à trouver sont : la source des informations, le numéro d'identification, la localisation, l'élévation, la profondeur du puits, le niveau statique et le log géologique contenant les intervalles de profondeur et la lithologie. L'épaisseur de la zone vadose est calculée par la connaissance du niveau de la nappe. Enfin un inventaire des faibles et moyennes perméabilités doit être inclus ainsi qu'une description du matériel à la surface de la nappe.

Étape 3 : Détermination de l'épaisseur de la zone vadose et la localisation des points. Dans la plupart des cas le niveau statique de la nappe correspond à l'épaisseur de la zone vadose. Dans le cas où du matériel confinant est traversé par un puits de forage le niveau statique ne peut être utilisé comme niveau de la nappe.

Étape 4 : Détermination de la terminologie utilisée pour les points de subsurface. La description des matériaux est parfois floue. Elle est différente selon la source de l'information d'où la nécessité de les répertorier en catégories classées :

Tableau 25 : classification des formations selon la terminologie employée.

Terminologie de l'ingénierie (ASTM)	Terminologie géologique	Terminologie de forage	Catégorie de classement
<i>Matériel non consolidé</i>			
gravier argileux, gravier silteux, gravier faiblement granoclassé, gravier bien granoclassé, sable faiblement granoclassé, sable bien granoclassé	plaine d'épandage, sable et gravier glaciaire, dépôts de terrasse, matériaux organiques, tourbes, loess, silt et sable fin glaciaire	tout type de combinaison de sable et gravier qui n'inclut pas le terme d'argile	2
sable silteux, sable argileux	till sablo-loameux, till loamo-sableux, alluvion, colluvion	sable argileux, argile sableuse, bassin sédimentaire, argile graveleuse, roc et argile, toute autre description modifiée par l'argile	3
argile lourde, argile pauvre	argile glaciaire, till loameux, till argilo-loameux, till argileux	argile	4
<i>Matériel consolidé</i>			
calcaire, dolomie	calcaire karstique, calcaire, dolomie	calcaire, limerock Shakopee, prairie du chien, etc, roc	1
sable, roche ignée ou métamorphique	sable, roche ignée ou métamorphique	sable, Sandrock Jordan, St Peter, etc., roc	2
siltstone	silt, séquence interlitée ou dépôt mixtes, calcaire shaleux, shale sableux	shale modifié par le calcaire ou le sable, mudrock	3
shale	shale	shale	4

Étape 5 : Détermine la présence d'unités de perméabilité faible à modéré. Le matériau des dix premiers pieds de la zone vadose n'est pas évalué. La présence de ces unités de faible ou moyenne perméabilité peut être assignée en 4 catégories :

- une unité de faible perméabilité d'au moins 10 pieds d'épaisseur;
- un ensemble d'unités de faibles perméabilité dont l'épaisseur est égale ou supérieure à 10 pieds, sans aucune des unités de plus de 10 pieds d'épaisseur.
- une unité de perméabilité modérée d'au moins 20 pieds d'épaisseur.
- pas d'unité de faible perméabilité supérieure à 10 pieds ou d'unité de perméabilité modérée supérieure à 20 pieds.

Dans cette méthode la manière de classer les unités de faible ou moyenne perméabilité se fait avec le temps de passage de l'eau dans l'unité :

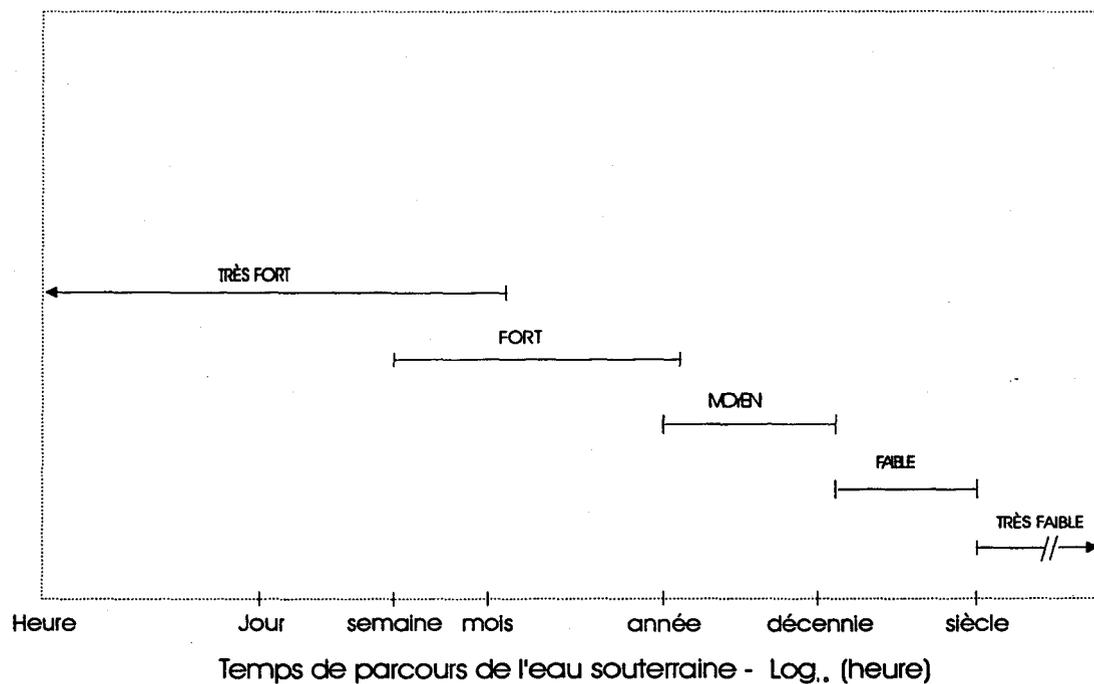


Figure 4 : Détermination de l'indice de vulnérabilité fonction du temps de parcours de l'eau souterraine.

Pour les informations provenant de description de foreurs, un certain nombre de détails manquent pour cette raison les seuls termes acceptables quant à la détermination d'unités faiblement perméables sont les « argiles » et les « shales ». De même pour la classification ingénieur, les formations de faible perméabilité sont celles qualifiées de CH (fat clay) et CL (lean clay), et celles de moyenne perméabilité celles qualifiées de SM (silty sand) et SC (clayey sand) et siltstone.

En général les formations de faible perméabilité sont classifiées de catégorie 4 et celles de moyenne perméabilité de catégorie 3.

Étape 6 : Détermination du matériel au niveau de la nappe. Le matériel à ce niveau est utilisé pour modifier le taux de sensibilité du matériel de la zone vadose. Le taux est estimé en fonction du temps nécessaire pour atteindre le système aquifère.

Étape 7 : Application des informations recueillies aux étapes 5 et 6 pour classer chaque point. L'étape 5 permet de savoir si un matériau est plus ou moins perméable et l'étape 6 permet de connaître le matériau à la surface de la zone vadose, la combinaison de ces deux informations permet de déterminer une échelle de sensibilité :

Tableau 26 : Mise en place des indices de vulnérabilité du niveau 2

	Classification des matériaux à la surface de la nappe										
	1 (karst)			2		3		4			
Épaisseur totale de la zone vadose (pieds)	<20	20-50	>50	<20	>20	<20	>20	<20	>20		
UNITES DE FAIBLE ET MOYENNE PERMÉABILITÉ DANS LA ZONE VADOSE											
pas d'unité de faible ou moyenne perméabilité	Très fort (VH)	Très fort (VH)	fort (H)	Très fort (VH)	fort (H)	Modéré (M)	Modéré (M)	Faible (L)	Faible (L)		
ensemble de minces unités de faible perméabilité > à 10 pieds	-	fort (H)	Modéré (M)	-	Modéré (M)	-	Modéré (M)	-	Faible (L)		
une unité de perméabilité moyenne > à 20 pieds	-	fort (H)	Modéré (M)	-	Modéré (M)	-	Modéré (M)	-	Faible (L)		
une unité de faible perméabilité > à 10 pieds	-	Modéré (M)	Faible (L)	-	Faible (L)	-	Faible (L)	-	Faible (L)		

Étape 8 : Mise en place des points et des classes sur la carte. Il faut un nombre suffisant de points pour pouvoir extrapoler les valeurs de sensibilité.

Dans le cas présent, le nombre de point de contrôle est important, la carte au 1/100000^{ième} n'est pas lisible si tous les points sont conservés. Ainsi afin de déterminer si la carte de niveau 2 est cohérente avec la carte de niveau 1

Procédure générale (méthode des surfaces) :

Étape 1 : Construction ou obtention d'une carte géologique de surface.

Étape 2 : Construction ou obtention d'une carte de profondeur de la nappe.

Étape 3 : Détermination de la présence et étendue latérale des unités cartographiées.

Étape 4 : Construction de la carte de sensibilité.

Avantages et inconvénients :

Comparée au niveau 1, cette carte permet une évaluation plus réaliste de la sensibilité de l'aquifère. L'estimation par point permet une ébauche initiale lorsque les cartes de subsurface ne sont pas disponibles?

Explications niveau 3 :

Identification de ces zones à partir de puits ou de cartes géologiques.

Tableau 27 : paramètres relatifs au niveau 3 de la méthode du Minnesota.

Identification des aquifères profonds
différence de charge entre deux puits rapprochés
conditions insaturées dans un aquifère sous le niveau de la nappe
une couche de shale, d'argile, d'argile lacustre, de till argileux ou de till loameux argileux de 10 pieds sous la surface
Différences dans la chimie des eaux souterraines entre deux aquifères

Matériaux géologiques définis comme matériau confinant
<i>dépôts non consolidés</i>
argile lacustre
till argileux
till loameux argileux
<i>socle rocheux</i>
Shale
terminologie "Générique" utilisée dans l'annuaire des puisatiers
"argile"

Procédure pour calculer l'indice "L" aquifères profonds	
Étape 1.	épaisseur de chaque couche confinante/10 = valeur approximée de "L"
Étape 2.	valeur de "L" arrondie au nombre entier le plus proche pour obtenir l'indice "L" de la couche confinante
Étape 3.	ajout de l'indice "L" de chaque couche confinante pour obtenir un indice total pour les aquifères. Si l'indice est égal ou supérieur à L-5 le taux de sensibilité est "Very Low".

Une estimation de niveau 3 permet l'évaluation de la sensibilité des aquifères situés sous les aquifères de surface. La méthodologie est la même que celle du niveau 2, le degré de sensibilité

étant basé sur la mise en évidence de couche confinante (de faible perméabilité), et l'évaluation de l'épaisseur cumulée de couches de faibles perméabilité.

Les activités humaines n'auront pas ou très peu d'effets sur les aquifères profonds. Cependant des effets à long terme de l'écoulement latéral au niveau des zones de recharge pourront être significatif.

Identification des aquifères profonds

Tous les matériaux situés entre la surface et la première couche confinante sont considérés comme faisant parti de l'aquifère de surface.

Conditions géologiques et hydrogéologiques pouvant indiquer la présence d'une ou plusieurs couche confinante :

- 1- Différence de charge hydraulique dans deux puits proche l'un de l'autre (semble indiquer qu'il s'agit de 2 aquifères différents).
- 2- Conditions non saturées dans un aquifère sous le niveau de la nappe.
- 3- Une couche de shale, d'argile, d'argile glaciaire, de till argileux ou de till argiloloameux à moins de dix pieds sous le niveau de la nappe.

Résultat :

Trois cartes superposées. Sachant que la première comporte les résultats les moins complets, mais couvrant la zone entière.

Référence d'utilisation :

* F. Bergsrud et al., 1991. Department of Minnesota Natural Resources, Division of Waters. Assessing Geologic Sensitivity of Ground water Resources in Minnesota, chapter VIII, Sample area, Hennepin county.

1.2.5. Potential for contamination of Shallow aquifer in Illinois

Références :

Berg R.C., Abert C.C.

Keefer D.A.

Kempton J.P., Cartwright K.

Illinois department of energy and natural resources, state geological survey division.

Nombre de paramètres :

Procédure :

Il s'agit d'une méthode de cartographie qui permet la détermination du potentiel de contamination des aquifères de surface. Elle a été développée, il y a une dizaine d'année, par la commission géologique des États-Unis.

Il s'agit à l'origine d'un modèle développé pour protéger les eaux souterraines d'éventuelles contaminations aux nitrates et pesticides. Le modèle développé peut être divisé en deux groupes : un modèle de transports de soluté et un modèle de cartographie.

Résultat :

Obtention d'une carte de sensibilité à la contamination à 6 classes :

Excessive, forte, modérée, quelque peu limitée, limitée, très limitée.

Cette méthode a été appliquée en Illinois, et on se proposait ici de l'utiliser pour les aquifères du Québec. Mais la méthode *Assessing geologic sensitivity of ground water resources in Minnesota* proposait plus de détail au niveau de l'application de la méthode.

Référence d'utilisation :**1.2.6. Wisconsin's groundwater management plan****Références :**

R. Schmidt.

Groundwater Wisconsin's buried treasure, Wisconsin department of natural resources bureau of water resources management.

Nombre de paramètres : 5**Procédure :**

Il s'agit d'une méthode développée au département des ressources naturelles du Wisconsin et appliquée au Wisconsin. L'application de cette méthode selon les auteurs requiert les efforts de spécialistes dans le domaine des sols, de la géologie glaciaire, de stratigraphie, de la gestion des eaux souterraines et de l'hydrologie.

Les 5 paramètres utilisés sont :

- Les caractéristiques du sol (les 5 premiers pieds sous la surface)
Les 3 caractéristiques considérées ici sont la perméabilité du sol, la capacité de rétention et

la texture. Les propriétés chimiques des sols ne sont pas considérées (les propriétés chimiques spécifiques à chaque contaminant n'étant pas considérées).

- Les dépôts de surface (matériaux non consolidés entre le sol et le haut du bedrock)
La texture et la perméabilité des dépôts de surface affecte le taux auquel l'eau d'infiltration traverse le niveau de la nappe.
- Profondeur à la nappe (le niveau de la nappe est la frontière entre la zone non saturée et la zone saturée (Freeze et Cherry, 1979).
C'est la distance de la surface à la nappe. Il s'agit d'un paramètre peu important pour l'estimation de la vulnérabilité, d'une part il est difficilement cartographiable, de plus dans la plupart des cas, un niveau élevé de la nappe ne permet pas un temps de contact assez important avec les matériaux terrestres pour que les processus d'atténuation soient efficaces, enfin si le matériel de la zone vadose est du sable ou du roc fracturé la profondeur importe peu, les processus d'atténuation ne pourront s'effectuer de manière efficace.
- Le type de socle (matériel consolidé sous le sol et les dépôts de surface, c'est la couche de roc la moins profonde). Dans le projet dans lequel cette méthode a été appliquée, il a été assumé que le socle est à plus de 15.20 m. Or d'après Kammerer (1984) lorsque le socle est profond la nappe se trouve dans les matériaux au-dessus (Schmidt, 1987).
- Profondeur au socle (distance de la surface au sommet des dépôts consolidés)
Les processus d'atténuation ne se produisent pas au même degré dans les dépôts consolidés que dans les dépôts de surface. La profondeur du socle permet d'évaluer la susceptibilité de contamination, du fait de l'indication de la profondeur des dépôts de surface.

Résultat :

Indice de vulnérabilité établi à partir de la formule suivante :

$$(BT_{\text{valeur}} * BT_{\text{multiplicateur}}) + (SD_{\text{valeur}} * SD_{\text{multiplicateur}}) + (WT_{\text{valeur}} * WT_{\text{multiplicateur}}) + (SC_{\text{valeur}} * SC_{\text{multiplicateur}}) = \text{Score composé (indice)}$$

avec :

BT : Type de socle

SD : Dépôts de surface

WT : Niveau de la nappe

SC : Caractéristiques du sol

Le poids pour chaque paramètre est affecté en fonction des caractéristiques du milieu, par exemple lorsque le socle est à moins de 5 pieds de la surface, pour plus de 70% du territoire, le facteur de multiplication affecté est de 13 pour le type de socle et de 0 pour les dépôts de

surfaces et de 1 pour le sol et le niveau de la nappe. Si c'est le cas seulement pour entre 35% et 70% de la zone dans ce cas, le type de socle passe à un facteur multiplicatif de 11, les dépôts de surface et la profondeur à la nappe à 1 et les caractéristiques du sol à 2. Enfin si c'est le cas pour moins de 35% de la zone le type de socle reste à 11 et les trois autres paramètres sont à 1.

Référence d'utilisation :

* R. Schmidt, wisconsin'groundwater management plan, report n°5, PUBL-WR-177-87, groundwater contamination susceptibility in Wisconsin, octobre 1987.

1.3. Méthodes analytiques et de modélisation numérique

1.3.1. Assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area as indicators.

Références :

L. Maxe, P-O Johansson, 1998

Division of land and water resources, royal institute of technology.

Nombre de paramètres : 3

Procédure :

Tableau 28 : propriétés du milieu utilisées pour l'élaboration de la méthode de Maxe et Johansson

Capacité de rétention	
<i>surfaces spécifiques pour différentes fractions de grains calculées à partir des mesures BET</i>	
matériel	surface spécifique (cm ² /cm ³)
argile	125000
silt	35000
sable	5000
gravier	insignifiant

Temps de passage						
<i>capacité d'infiltration dans les sols Nordiques</i>						
matériel	Capacité d'infiltration (mm d'eau/h)					
	n (nb sites)	min	25%	med	75%	max
argile, argile craquelée	31	6	40	100	160	320
silt, silt argileux	17	1	2	8	30	420
sable, gravier sableux	25	50	110	180	280	2600
till	54	40	90	180	360	5400
bedrock	14	0.2	-	2	-	6

Temps de passage				
<i>vitesse approximative du flux et temps de parcours vertical</i>				
sol	vitesse du flux d'eau	temps de parcours vertical		
		prof. 1m	prof. 2m	prof. 10m
gravier	10 à 100 m/h	< 1h	< 1h	< 1h
sable	10cm/j à 1 m/h	< 1j	1j à 1m	1j à 1an
silt	1cm à 1m/an	1m à 1an	> 1 an	> 10 ans
argile	1 à 10 cm/an	1m à 1an	-	-
till sableux	10 m/an à 1 m/h	< 1j	< 1j à 1m	1j à 1an
till argileux	10 cm à 100 m/an	1j à 1m	1m à 10a	>1m à 10a
tourbe	1 à 100 m/an	> 1j	-	-

Tableau 29 : méthodologie proposée pour l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines de la méthode de Maxe et Johansson.

<i>vulnérabilité de l'eau souterraine aux liquides déversés</i>		
tps de parcours en zone	exemple de lithologie dans la zone non saturée	vulnérabilité
< 1j	gravier	extrême
1j à 1m	sable, loam	forte
1m à 1an	sable fin, loam argileux	moyenne
> 1an	silt, argile	faible
<i>vulnérabilité des eaux souterraines aux contaminants transportés par la recharge naturelle</i>		
surface totale Zone non	exemple de combinaison de lithologie et épaisseur	vulnérabilité
< 1	< 2m de sable	extrême
1 à 5	2 à 10m de sable	forte
5 à 25	1.5m de silt à 2m d'argile	moyenne
25 à 100	(2 à 8m d'argile)	faible
> 100	(> 8m d'argile)	faible
<i>vulnérabilité des eaux souterraines en zones sans profil de sol ou pour émissions sous la surface de sol</i>		
total de surface		vulnérabilité
< 1		extrême
1 à 5		extrême
5 à 25		forte
25 à 100		moyenne
> 100		faible

Résultat :

Carte de vulnérabilité à 4 niveaux selon le type de dépôts de la zone non saturée (Cf.), puis un redécoupage est effectué dans chacune de ces zones en fonction de la surface (m²) du matériel, le découpage se fait en maximum 4 indices (faible, modéré, fort et extrême).

Le but est de réaliser une base pour une stratégie de protection des eaux souterraines.

Référence d'utilisation :

* L. Maxe, P-O. Johansson, 1998, assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area as indicators, hydrogeology journal, 6 : 441-449.

1.3.2. AQUIPRO :**Références :**

R.N. Passero, F.J. Cohen, S.J. Dulaney, P.M. Half, H. Moaddel, 1988
Center for water research, department of geology, western michigan university, Kalamazoo, MI 49008.

Nombre de paramètres : 3**Procédure :**

AQUIPRO est basé sur l'estimation que les argiles et les sédiments glaciaires argileux procurent une protection naturelle aux aquifères glaciaires.

Le logiciel AQUIPRO utilise les informations relatives aux logs de puits pour identifier un certain nombre facteurs. Tout d'abord la profondeur des puits est déterminée et un poids est assigné. L'hypothèse étant qu'un puits profond est mieux protégé qu'un puits de surface. Dans un second temps, la lithologie de chaque puits est examinée avec la détermination du nombre et de l'épaisseur des couches d'argile. Les puits avec une seule couche d'argile épaisse sont supposés être mieux protégés que ceux avec plusieurs couches d'argiles peu épaisses.

En fait la profondeur pondérée des puits et l'épaisseur moyenne pondérée des couches protectrice d'argile, de sédiments glaciaires argileux et des types de roche de fond confinante et semi-confinante sont les éléments pris en compte ici. Toutes ces estimations sont incorporées dans un algorithme qui calcule un indice relatif pour chaque puits analysé. Les indices AQUIPRO sont combinés en groupes de risques allant de 1 à 5, dont les puits du groupe 5 sont les mieux protégés et ceux du groupe 1 les plus vulnérables à la contamination de surface.

Résultat :

La méthode a été utilisée pour indiquer les cotes de vulnérabilité des aquifères pour des puits individuels. Il est important de noter qu'AQUIPRO offre une mesure de protection relative, permettant la comparaison entre les puits de différentes localisations géographiques.

Référence d'utilisation :

* <http://www4.gvsu.edu/wri/dss/2dss.htm>

* EPA, 1993. A review of methods for assessing aquifere sensitivity and ground water vulnerability to pesticide contamination.

1.3.3. EVARISK**Références :**

O. Banton, M.A. Gosselin, M. Larocque, 1997. INRS-Eau.

Nombre de paramètres : 3**Procédure :**

Il s'agit d'une méthode analytique, définie comme outil d'évaluation des risques de contamination des eaux souterraines par les sources diffuses, à l'échelle régionale. Ce logiciel a été réalisé en 1997 par l'INRS-Eau. Il s'agit d'un logiciel très simple d'utilisation dont la plupart des informations utiles sont incorporées au logiciel via une base de données.

EVARISK permet de simuler différents composés (transport de sels de déglacage, transformation et migration des hydrocarbures miscibles, des pesticides et des nitrates), dans un contexte de gestion à l'échelle régionale, ici on ne s'intéressera qu'à la migration de l'eau seule (donc au flux d'eau lessivé).

Le fondement théorique d'EVARISK s'appuie en grande partie sur les travaux réalisés lors du développement du modèle AgriFlux, modèle mécaniste et stochastique permettant de simuler les flux d'eau et les transformations de l'azote et des pesticides dans la zone non saturée du sol. Les principales différences entre ces deux logiciels, c'est que si le premier nécessite peu de données d'entrée, le second permet une estimation locale de la vulnérabilité.

Il est important de préciser que ce logiciel a été conçu pour étudier les processus d'atténuation et d'écoulement au niveau des premiers mètres sous la surface, de plus il est surtout dédié à l'étude

de quatre types de polluants : les sels de déglacage, fertilisants azotés, pesticides, et hydrocarbures.

Les paramètres

Le nombre de paramètres nécessaire dépend des composés à simuler.

La plupart des paramètres sont incorporés au logiciel (voir ci-dessous). Les paramètres fournis par l'utilisateur sont au nombre de trois :

- la composition des différentes couches de sol.
- la présence d'une pente ou non.
- le type de végétation avec la quantité d'eau consommée.
- sélection de la région d'étude afin que les valeurs moyennes des paramètres par défaut soient représentatives.

Ils sont considérés comme ayant une distribution normale avec un écart type de 10% de la valeur fournie.

Étant donné que dans le cadre de cette étude on ne fait intervenir aucun polluant, je ne parlerai pas ici des paramètres spécifiques aux contaminants, ni de ceux non essentiels au fonctionnement du moteur de simulation tels que la température ou le besoin en azote.

Les paramètres incorporés :

La détermination du bilan hydrique :

Précipitations :

Les précipitations journalières sont générées de manière aléatoire (d'après leurs caractéristiques statistiques), sachant qu'elles suivent une distribution exponentielle.

La génération des précipitations se fait en deux étapes :

- Tirage aléatoire d'une suite de jours secs et pluvieux.
- Génération d'une valeur de densité de probabilité normalement distribuée.

Les équations représentatives sont les suivantes :

$$F = 1 - e^{-\lambda X} \quad X = -\ln(1-F)/\lambda \quad \lambda = 1/P_{mm}$$

F : fonction de probabilité de réalisation de l'événement X

X : événement de probabilité F

λ : paramètre de la loi exponentielle

P_{mm} : précipitation moyenne mensuelle (m)

Cette approche nécessite **12 valeurs de précipitations moyennes mensuelles et le nombre de jours de précipitations par année**

Fonte de la neige :

L'approche utilisée dans EvaRisk est une approche par degrés-jours. Cette méthode d'évaluation n'utilise que **la température de l'air** comme facteur (influence combinée des radiations, du vent, de la pluie et des échanges thermiques) (*Linsley et al, 1975*).

$$\text{Fonte} = K_f * I_j * T_{\text{air}}(t)$$

Fonte : hauteur d'eau rendue disponible par la fonte (m)

K_f : taux de fonte journalier ($\text{m} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$)

$T_{\text{air}}(t)$: température de l'air au temps t.

Le principe est le suivant : On admet que les précipitations s'accumulent sous forme de neige à la période hivernale ; au printemps un facteur de réduction est appliqué à la quantité totale de précipitations tombées pendant la période hivernale. A la méthode des degrés-jours, le mûrissement du stock de neige a été ajouté, afin de décaler le début de la fonte de quelques jours (consiste à saturer le stock de neige), le pourcentage d'eau retenue dans le stock de neige est fixé à 10%.

Infiltration et ruissellement

L'approche utilisée est basée sur le **calcul de l'infiltration** plus que sur celui du ruissellement. L'infiltration est calculée comme étant la valeur minimale entre le volume d'apport et le volume d'eau qui peut s'infiltrer dans la première couche ; l'eau excédentaire est alors entièrement ruisselée si la **pente** est non nulle, sinon elle s'accumule à la surface et peut s'infiltrer le jour suivant si les teneurs en eau de la première couche le permettent. Une évaluation approximative de la pente du terrain est donc suffisante dans cette représentation.

Prélèvement d'eau par la végétation

Il s'agit de la quantité d'eau extraite par les racines et permet d'établir le bilan en eau de chaque couche de la zone racinaire pour chaque jour, l'utilisateur peut choisir de ne pas en tenir compte. L'équation représente une approximation de la fonction de répartition d'une normale centrée-réduite (Abramovitz et Stegun, 1972) :

$$F(x) = 1 / (1 + \exp(-1.5976 * z * (1 + 0.04417 * z^2)))$$

$$z = (x - \mu) / \sigma$$

$$\mu = (\text{mat} - \text{emer}) / 2$$

$$\sigma = (\text{mat} - \text{emer}) / 6$$

$F(x)$: fonction de répartition d'une gaussienne centrée-réduite

X : quantième du jour pendant le prélèvement
 m : moyenne de la distribution
 s : écart-type de la distribution
 emer : quantième du jour d'émergence de la culture
 mat : quantième du jour de maturité de la culture.

Évaporation

C'est le transfert d'eau des couches superficielles du sol vers l'atmosphère géré par le gradient d'humidité. Ce processus intervient, dans le modèle, après le prélèvement d'eau par la plante. L'évaporation potentielle journalière est obtenue en divisant l'évaporation potentielle mensuelle des mois où il y a évaporation par le nombre de jours dans le mois.

Percolation

C'est le transport vertical de l'eau entre les couches du sol et vers la nappe phréatique. L'approche est basée sur une représentation des mécanismes physiquement simplifiée : chaque couche de sol est définie comme un réservoir. L'eau peut s'accumuler dans une couche jusqu'à ce que tous les pores soient saturés. Si la teneur en eau dépasse la capacité au champ, l'excédent peut s'écouler par gravité vers la couche suivante selon l'équation d'écoulement de Darcy-Richards. L'écoulement d'une couche à la suivante s'effectue à la vitesse déterminée par la conductivité hydraulique non saturée de la première couche (approche de Darcy-Richards), cette valeur étant calculée à l'aide de la relation cubique de Irmay (Bear, 1988) :

$$K(\theta) = K_{\text{sat}} \times ((\theta - \theta_{\text{cap}}) / (n - \theta_{\text{cap}}))^3$$

$K(\theta)$: conductivité hydraulique non-saturée (m.j^{-1})

K_{sat} : conductivité hydraulique saturée (m.j^{-1})

θ : teneur en eau de la couche ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)

θ_{cap} : capacité au champ ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)

n : porosité ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)

Température

Étant donné que l'on ne simule le passage d'aucun polluant on ne tient pas compte de la température au sol. Par contre la température de l'air est importante pour la fonte des neiges.

L'identification des deux jours où la température de l'air passe par le point de congélation (0°C) est nécessaire pour effectuer l'accumulation et la fonte de neige. L'approche choisie est la suivante :

$$T_{\text{air}}(t) = T_{\text{moy(air)}} - T_{\text{ampl(air)}} \sin(\omega(t-t_{\text{ph}}))$$

$T_{\text{air}}(t)$: température moyenne journalière de l'air au jour t (°C).

Les informations à fournir pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque sont :

Le sol

L'épaisseur et la texture de chaque type de sol avec le pourcentage de matière organique, et d'azote présents.

Le terrain étudié doit être divisé en au moins 4 couches de sol physiquement homogène. La première couche est le réservoir qui gère les volumes d'eau ruisselés.

Une texture est caractérisée par ses propriétés physiques et sa composition, ici elles sont au nombre de 9 :

Tableau 30 : Propriétés physiques des textures

Textures	Densité (g/cm ³)	Conductivité hydraulique (m/j)	porosité (m ³ /m ³)	capacité au champs (m ³ /m ³)	point de flétrissement (m ³ /m ³)
Argile	1.40	0.0078	0.475	0.396	0.272
Argile limoneuse	1.45	0.0123	0.479	0.387	0.250
Argile sableuse	1.60	0.0414	0.430	0.339	0.239
Loam argileux	1.40	0.0503	0.464	0.318	0.197
Limon	1.30	0.1338	0.501	0.330	0.133
Loam	1.45	0.2603	0.463	0.270	0.119
Loam sableux	1.55	0.9177	0.453	0.207	0.095
Sable loameux	1.00	2.7886	0.437	0.125	0.055
Sable	1.60	7.3638	0.437	0.091	0.033

Tableau 31 : Composition des textures

Textures	Contenu en sable (%)	Contenu en limon (%)	Contenu en argile (%)
Argile	[0,40]	[0,40]	[40,80]
Argile limoneuse	[0,12]	[41,53]	[41,53]
Argile sableuse	[46,58]	[0,12]	[36,48]
Loam argileux	[29,37]	[29,37]	[29,37]
Limon	[12,32]	[55,75]	[3,23]
Loam	[38,46]	[36,44]	[14,22]
Loam sableux	[57,69]	[19,31]	[6,18]
Sable loameux	[80,86]	[9,15]	[2,8]
Sable	[90,94]	[3,7]	[1,5]

Les options

- la présence ou non d'une pente, afin de savoir s'il y a ruissellement ou accumulation.
- la présence ou non d'un drainage Il s'agit ici de drainage artificiel dont nous ne tiendrons pas compte dans cette étude, il en découle une non-utilisation de l'option présence d'une couche imperméable à la base (qui sert à tenir compte de la montée de l'eau dans le cas de la présence d'un drain).

La végétation

Il s'agit d'estimer la quantité d'eau prélevée par les plantes. Le début de la croissance correspond au début du prélèvement d'eau et d'azote par la plante, et la fin du prélèvement correspond à la fin du prélèvement. Il faut également indiquer la profondeur des racines.

Ce prélèvement d'eau par la plante permet d'établir un bilan en eau de chaque couche de la zone racinaire. La courbe de prélèvement d'eau par la plante est associée à une courbe normale, dont l'équation est la suivante :

$$F(x) = 1 / (1 + \exp(-1.5976 * z * (1 + 0.04417 * z^2)))$$

$$z = (x - \mu) / \sigma$$

$$\mu = (\text{mat} - \text{emer}) / 2$$

$$\sigma = (\text{mat} - \text{emer}) / 6$$

F(x) : fonction de répartition d'une gaussienne centrée-réduite

X : quantième du jour pendant le prélèvement

m : moyenne de la distribution

s : écart-type de la distribution

emer : quantième du jour d'émergence de la culture

mat : quantième du jour de maturité de la culture.

Résultat :

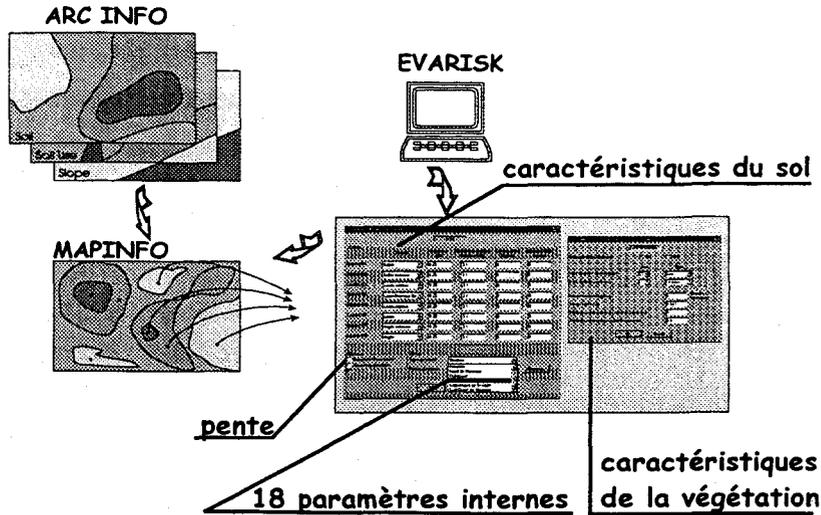


Figure 5 : La méthode EVARISK.

Le résultat, obtenu ponctuellement, est une moyenne de quantité d'eau lessivée (dans le cas de notre étude, mais ce peut être une quantité d'un des 4 types de polluants) en m pour un an. Une forte hauteur d'eau lessivée sous-entend une faible protection de l'aquifère.

Référence d'utilisation :

- * O. Banton, M.A. Gosselin, M. Larocque, 1997. Evarisk 1.0, manuel d'utilisation, version préliminaire, outil d'évaluation des risques de contamination des eaux souterraines par les sources diffuses.
- * AGÉOS et INRS-Eau, 1997. 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 5.

Définition du site - Exemple

SITE

Terrain	Texture	Épaisseur (m)	Contenu en matière organique (%)	Contenu NH4 (kg/ha)	Contenu N03 (kg/ha)
Couche #1	Sable	0.25	3.1	0	0
Couche #2	Sable limoneux	0.25	3.1	0	0
Couche #3	Loam sableux	0.25	3.1	0	0
Couche #4	Loam limoneux (fir)	0.25	3.1	0	0
Couche #5	Loam argileux	0.25	3.1	0	0
Couche #6	Loam	0.25	3.1	0	0
Couche #7	Argile sableuse	0.25	3.1	0	0
Couche #8	Argile	0.25	3.1	0	0

Options

Présence d'une pente
 Présence d'un diem
 Localisation

Climat

Type de climat: Québec
Fiches de climat: Maurice, Nord de Montréal, Outaouais, Québec, Saguenay-Lac St-Jean, Sud-Ouest de Montréal

Parcourir

OK

Figure 6 : paramètres concernant les informations sur la pédologie et sur la pente.

Caractéristiques de la végétation - Exemple

VEGETATION

Présence d'une végétation: OUI NON

Date de début de croissance: Jour: 23, Mois: Avril

Date de fin de croissance: Jour: 22, Mois: Octobre

Besoin en Azote (kg/ha): 0 (Utiliser la fertilisation)

Besoin en Eau (m): 0.143

Profondeur des racines en début de saison (m): 0

Profondeur des racines en fin de saison (m): 0.1

OK Annuler

Figure 7 : informations sur la végétation.

1.3.4. SEEP/W

Références :

GEO-SLOPE International (société de logiciels géotechniques depuis 1977)

Procédure :

Logiciel d'éléments finis permettant l'analyse des problèmes de déperdition de l'eau souterraine et de dissipation de la pression dans les pores d'eau.

Résultat :

Les types d'analyse permis par ce logiciel sont l'estimation du flux en régime permanent et transitoire, flux du milieu confiné ou non confiné, flux bidimensionnel dans un plan vertical, flux tridimensionnel axisymétrique, flux bidimensionnel en plan.

Référence d'utilisation :

* <http://www.geo-slope.com/seepw01.htm>

1.4. Conclusions et notion de risque :

Le répertoire des méthodes établi ici n'est pas exhaustif, il existe sans aucun doute d'autres méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. On peut notamment remarquer que des méthodes d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque, spécifique à un type de site donné, ont été élaborées. Ainsi :

1.4.1. HEI

Référence : F. Aubre, Développement d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec, mémoire de maîtrise, école des gradués université Laval, faculté des sciences et génie, 1992.

Contaminant : divers

Source : diverses

Site : station de pompage

Nombre de paramètres : 4

Type de méthode : cotation numérique

Résultat : Indice résultant de la somme de la cote de chaque paramètre multiplié de son poids. Ces paramètres sont l'évaluation de la zone de recharge, les sources potentielles de contamination à l'intérieur de la zone de recharge, les sources de contamination à l'intérieur de la zone de recharge, la capacité d'atténuation du milieu envers le contaminant.

Références : G.J. Heij, soil and groundwater research laboratory. Classification of groundwater pumping stations in the utrechtse heuvelrug area.

1.4.2. méthode site (surface) impoundment assessment ou Legrand modifiée

Référence : US EPA, 1979

Contaminant : divers

Source : ponctuelle

Site : Site d'enfouissement

Nombre de paramètres : 5

Type de méthode : cotation numérique

Résultat : indice de qualité, issu de la somme des cotes pour la zone non saturée, l'épaisseur de la zone non saturée, la disponibilité de l'eau souterraine, la qualité de l'eau souterraine, la source des déchets. Cet indice est alors classé en fonction du danger potentiel face aux points d'approvisionnement en eau. Le résultat final est donné en listant la cote accordée à chacune des étapes accompagnée de son degré de confiance, dans un ordre précis.

1.4.3. Farm-A-Syst

Références : Cates et Madison, 1991

Contaminant : divers

Site : ferme

Nombre de paramètres : 8

Type de méthode : cotation numérique

Résultat : indice numérique de potentiel de contamination = basé sur Sl_R , Sb_R .

Sl représente les caractéristiques du sol déterminées à partir de la méthode SCAM.

Sb : matériels géologique et de subsurface sont évalués en obtenant une cote relative à la lithologie des matériaux (et parfois à leur épaisseur) et à la profondeur de l'eau souterraine à chaque site.

Références :

K.J. Cates et F.W. Madison, 1991, University of Wisconsin – Extension Bulletin G3536-11W, 14p. Farm-A-Syst Farmstead assessment System, worksheet # 11 – Site evaluation.

M.S. Bridson, M.F. Bohn, F.W. Madison, 1994, Wisconsin geological and natural history survey, open file report 94-03. Evaluation of groundwater susceptibility assessment systems in Dane County, Wisconsin : explication et comparaison de différentes méthodes.

Il y a également les méthodes d'estimation de la vulnérabilité que l'on pourrait classer de spécifique étant donné qu'il est nécessaire de spécifier des propriétés concernant les contaminants, mais qui ne sont pas spécifiques à un type de contaminant particulier :

1.4.4. Bachmat et Collin

Références : F. Aubre, Développement d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec, mémoire de maîtrise, école des gradués université Laval, faculté des sciences et génie, 1992.

Source : ponctuelle

Nombre de paramètres : plus de 6

Type de méthode : analytique

Résultat : volume d'eau contaminée. Le résultat final représente la quantité d'eau souterraine devenue impropre à la consommation et s'obtient par l'équation :

$$\delta L = \frac{\delta L}{\delta C} * \frac{\delta C}{\Delta S} * \frac{\Delta S}{\delta A} * \delta A$$

δL : indicateur de la pollution de l'eau souterraine potable.

δC : augmentation de la concentration du contaminant dans l'eau souterraine.

ΔS : augmentation de la masse de contaminant à la source due à l'activité humaine.

δA : variation de l'activité humaine.

$\frac{\delta C}{\Delta S}$

— : dépend du temps de parcours du contaminant de la source à la nappe qui se

ΔS

calcule à l'aide de modèles mathématiques.

Référence d'utilisation : Y. Bachmat et M. Collin, Israel hydrological service. Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution.

1.4.5. Ground water contamination site raking methodology

Références : Olivieri, Eisenberg et Cooper, 1986

Source : ponctuelle

Nombre de paramètres : 24

Type de méthode : cotation numérique

Résultat : indice en valeur ponctuelle ou en plage. Il s'agit de la somme des 24 paramètres, tant ceux caractéristiques du site (rapport à la distance du site aux points de captage d'eau souterraine, l'utilisation de l'eau souterraine, la profondeur de la nappe, la perméabilité et le gradient hydraulique) que ceux spécifiques à la sévérité de contamination (rapport à la toxicité du contaminant, les propriétés physico-chimiques du contaminant, le degré de contamination).

Enfin, il existe également énormément de méthodes d'estimation de la vulnérabilité spécifique à certains types de contaminants, en voici un bref aperçu :

1.4.6. Groundwater Ubiquity Score(GUS)

Références : Gustafson, 1989

Contaminant : Pesticide

Source : diverses

Nombre de paramètres : 2

Type de méthode : analytique

Résultat : Indice GUS = $(\ln t_{1/2}) * (4 - \ln Koc)$

Note; Koc : coefficient de partage entre le carbone organique du sol et de l'eau.

$T_{1/2}$: demi-vie du pesticide dans le sol.

1.4.7. Hydro-Québec

Références : hydro-québec, 1987

Contaminant ; hydrocarbures

Source : ponctuelle

Nombre de paramètres : 8

Type de méthode : analytique

Résultat : risque de pollution, calculé par une équation dépendant de facteurs relatifs à la sensibilité du milieu (tel que la distance du site aux habitations et bâtiments...), la vulnérabilité des terrains (tel que l'infiltration dans le sol ...).

1.4.8. LEACH

Références : Dean, Jowist et Doniagian, 1984

Contaminant : Produits agro-chimiques (pesticides)

Source : diffuse ou frontale

Nombre de paramètres : au moins 4

Type de méthode : analytique

Résultat : matrice mettant en relation le facteur de retard et le taux de désintégration K_s du contaminant. Il faut alors se référer à un graphique afin d'obtenir un pourcentage de contaminant qui atteindra la nappe en fonction du temps.

1.4.9. Landfill site rating (LSR)

Références : Legrand et Brown, 1977

Contaminant : déchets liquides

Source : ponctuelle

Nombre de paramètres : 4

Type de méthode : cotation numérique

Résultat : indice de qualité. Le résultat final est donné en listant la cote accordée à chacune des étapes dans un ordre précis, en débutant par l'indice de qualité.

1.4.10. Méthode Legrand

Références : Legrand, 1983

Contaminants : déchets variés

Source : ponctuelle

Nombre de paramètres : 4 à 6

Type de méthode : cotation numérique

Résultat : indice de qualité et risque. Les paramètres dont la cote est additionnée pour donner l'indice sont la distance par rapport au point de captage d'eau, la profondeur de la nappe, le gradient hydraulique, la perméabilité-atténuation en fonction des matériaux. Le résultat final est

donné en listant le résultat de chaque étape de la méthode, en débutant par l'indice de qualité. Le danger de contamination est ensuite évalué en estimant la vulnérabilité de l'aquifère et la dangerosité des contaminants. En comparant les deux indices précédents (indice de qualité et danger de contamination), il est possible d'évaluer le risque de contamination relié au site lui-même.

1.4.11. Pesticide index

Références : Rao, Hornsby et Jessup, 1985

Contaminant : Pesticide

Source : diffuse ou frontale

Nombre de paramètres : 11

Type de méthode : Analytique

Résultat : Facteur d'atténuation FA

1.4.12. Pesticide root zone model (PRZM)

Références : Carsel, Smith, Mulkey, Dean et Jowise, 1984

Contaminant : pesticide

Source : diffuse

Nombre de paramètres : 11

Type de méthode : modélisation numérique

Résultat : concentration le long du profil du sous-sol calculé par un modèle utilisant les différences finies. Les éléments nécessaires à l'application de la méthode, sont la concentration du pesticide, la teneur en eau du sol, le coefficient de diffusion et dispersion, la vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol et la profondeur.

1.4.13. Site rating methodology (SRM)

Références : Kufs, Twedell et al, 1980

Contaminant : déchets dangereux

Source : ponctuelle

Nombre de paramètres ; 31

Type de méthode : cotation numérique

Résultat : Niveau de risque. Ce niveau est calculé à partir de 31 paramètres ayant chacun un poids. Les paramètres sont regroupés en 4 ensembles, ceux concernant le milieu récepteur (tel que la population dans un rayon de 300m....), le vecteur de contamination (tel que le niveau de contamination....), les caractéristiques des déchets (tel que la radioactivité...), la gestion des déchets (tel que la sécurité du site...). Pour chacun de ces 4 groupes, un pointage additionnel est affecté en fonction d'autres paramètres. L'indice final s'obtient par la formule :

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i * C_i) + \text{pointages additionnels}}{\sum \text{pointages maximum possibles}} * 100$$

1.4.14. Site rating system

Références : Hagerty, Pavoni et Heer, 1973

Contaminant : déchets dangereux

Source : ponctuelle

Nombre de paramètres : 15

Type de méthode : cotation numérique

Résultat : deux indices. Le premier concernant l'évaluation du site utilisant les paramètres du sol (potentiel d'infiltration, potentiel de lixiviation, capacité de filtration, capacité d'adsorption), de l'eau souterraine (teneur en organique, effet tampon, distance de parcours entre le site et l'océan, vitesse d'écoulement de l'eau souterraine) et de l'air (direction des vents dominants, facteur de population). Le seconde concernant l'évaluation des déchets utilisant pour paramètres la toxicité humaine, la toxicité dans l'eau souterraine, le potentiel de transmission de maladies, la persistance biologique, la mobilité des déchets.

1.4.15. VULPEST

Références : J.P. Villeneuve, O. Banton, P. Lafrance, 1987 et 1990

Contaminant : pesticide

Sources : diffuse

Nombre de paramètres : 23

Type de méthode : modélisation numérique

Résultat : quantité de pesticide pouvant parvenir à la nappe. Le résultat peut être interprété en niveau de vulnérabilité par comparaison à des normes. Les principaux phénomènes modélisés sont le transport du pesticide (lié au déplacement de l'eau), le retard dans ce transport (lié à

l'adsorption), et la persistance du pesticide (liée à sa dégradabilité). La démarche adoptée est une démarche monté-carlo. Les paramètres à entrer dans le modèles sont les caractéristiques du sol (profondeur à la nappe, épaisseur de sol, nombre d'horizons, épaisseur de chaque horizon, perméabilité, porosité, densité etc...), du pesticide (nombre d'applications par an, taux d'application, profondeur d'application, etc...), de la culture (nombre de type différent de cultures, date d'émergence, date de maturation, potentiel maximum d'évapotranspiration, etc...)

Références d'utilisation :

P. Lafrance, O. Banton, P.G.C Campbell, J.P. Villeneuve, réseau 1989. Des pesticides dans l'eau souterraine : généralité sur l'état de la contamination aux pesticides au Québec et explication de l'intérêt de la modélisation du transport de ces pesticides par un logiciel de simulation tel que Vulpest.

J.P. Villeneuve, O. Banton, P. Lafrance, Ecological modelling, 51, elsevier science publishers, 1990. A probabilistic approach for the groundwater vulnerability to contamination by pesticides : the vulpest model : concepts généraux quant à l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Explications du fonctionnement des modèles stochastiques et plus particulièrement du modèle Vulpest.

O. Banton, P. Lafrance, J.P Villeneuve, water Pollution Research, Journal of Canada, 1989. Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides. Une application du logiciel VULPEST dans la région de Portneuf : Application du logiciel de modélisation stochastique VULPEST à 9 stations réparties sur un maillage de 80m*80m du site de Sainte-Catherine dans le comté de Portneuf. Les résultats (distribution statistique des principaux paramètres physiques) ont été comparés aux mesures de concentration réelles afin de juger de la qualité des prévisions réalisées grâce au logiciel.

J.P. Villeneuve, O. Banton, P. Lafrance. Vulpest, un nouvel outil d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides : intérêt de l'outil VULPEST d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pesticides.

J.P. Villeneuve, O. Banton, P. Lafrance, C. Blanchette, S. Deschênes, Rapport INRS-Eau n°234, 1987. VULPEST version 2 : un outil pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides, manuel d'utilisation.

1.4.16. Waste-soil-site interaction matrix

Références : Phillips, Nathwani et Mooij, 1977

Contaminant : déchets industriels

Source : ponctuelle

Nombre de paramètres : 17

Type de méthode : cotation numérique

Résultat : addition des valeurs de chaque paramètre reliés aux déchets, soit la toxicité humaine (si < 25), la toxicité dans l'eau souterraine (si < 25), le potentiel de transmission de maladies (si < 25), la persistance chimique, la persistance biologique, l'adsorption, la viscosité, la solubilité, l'acidité-basicité, le taux d'application des déchets. Addition de chaque paramètre relié au sol, soit la perméabilité du sol, l'atténuation, la profondeur de la nappe, le gradient hydraulique, l'infiltration, la distance du site au point d'approvisionnement en eau le plus près, l'épaisseur des matériaux non consolidés. Calcul d'un indice final correspondant à la multiplication des deux indices, et classification de ces indices en 10 classes.

1.4.17. Autres méthodes existantes.

Il existe un très grand nombre d'autres méthodes de ce type, et notamment des méthodes de modélisation numérique ou simulation telles que :

1.4.17.1. CHEMRANK

(D.L.Nofziger, P.S.C Rao, A.G.Hornsby, 1988)

Il s'agit d'un modèle interactif. Il utilise 4 schémas pour un groupe de produits chimiques organiques capable d'arriver à la nappe.

1.4.17.2. CMLS

(D.L.Nofziger, A.G.Hornsby, 1985, 1987)

Chemical Movement in Layered Soils est un modèle de simulation à une dimension qui localise les produits chimiques non-polaire dans la zone non saturée (Nofziger et Hornsby, 1985). La distribution des produits chimiques restant dans le sol est représentée en simplifiant le bilan d'eau.

1.4.17.3. GLEAMS

(R.A.Leonard, W.G. Knisel, D.A. Still)

Ground water loading effects of agricultural management systems, méthode développée par USDA-ARS (U.S. Department of agriculture's Agricultural Research Service), afin d'étudier les effets des systèmes de gestion agricole sur le mouvement des produits chimiques agricoles dans et à travers la zone racinaire (Leonard et al., 1987). Ce modèle incorpore les précipitations, l'infiltration et les processus d'écoulement.

Utilisé comme outil de comparaison dans une étude de l'université de Purdue (Navulur et Engel, 1997).

1.4.17.4. LEACHM

(R.J. Wagenet, J.L. Hutson, 1986)

Leaching Estimation and Chemistry Model est un modèle de différence fini pour la simulation du devenir des pesticides non-volatils dans la zone non-saturée. C'est l'un des rares modèles qui calcule le bilan d'eau en utilisant la formule de Richard.

1.4.17.5. MOUSE

(S. Pacenka, 1984)

Il s'agit d'un ensemble de modèles mathématiques pour le traçage du transport et du devenir des pesticides dans les zones non saturée et saturée. MOUSE est composé de 4 sous-modèles : le générateur d'informations climatiques, la calculateur de bilan d'eau de la zone vadose, les éléments permettant le transport de soluté dans la zone vadose et ce qui permet le transport d'eau et de soluté dans l'aquifère.

1.4.17.6. OPUS

(R.E. Smith, V.A. Ferreira, 1988)

Il s'agit d'un modèle de simulation par ordinateur d'un système agricole. Le modèle simule l'érosion hydrogéologique relative et les résultats d'un point de vu chimique selon différents scénarios de gestion et sous différents climats. L'objectif du modèle est d'indiquer une réponse du système relative à différentes pratiques de gestion.

1.4.17.7. PATRIOT

(P.R. Hummel, J.C Imhoff, J.W. Kittle, R.F. Carsel)

Il s'agit d'un système de modélisation dynamique consistant en une combinaison de modèles de flux et de transport (PRZM-2); bases de données des précipitations, présence géographique du sol, propriétés du sol, propriétés des pesticides; gestion de base de données; estimateur de paramètre de rétention d'eau dans le sol; et des procédures permettant la comparaison des potentiels de lessivage pour différentes combinaisons du matériel géologique au niveau de la nappe.

1.4.17.8. PESTANS I et II

(G.C. Enfield, R.F. Carsel, S.Z. Cohen, T. Phan, D.M. Walters, 1982)

PESTANS I est un modèle à une dimension en régime permanent limité au mouvement vertical à travers la zone non saturée. PESTANS II est un modèle numérique en régime transitoire bidimensionnel qui prédit les mouvements horizontaux et verticaux de l'eau et des pesticides.

1.4.17.9. PRZM-2

(J.A. Mullins, R.F. Carsel, J.E. Scarbrough, A.M. Ivery, 1993)

L'EPA a développé ce modèle pour évaluer le potentiel de lessivage des pesticides dans les conditions de terrain. Le modèle décrit le processus complet précipitation-infiltration-écoulement en relation avec le devenir des pesticides dans l'environnement. PRZM a été adapté afin d'employer la technique Monté-Carlo pour assigner la probabilité de lessivage.

1.4.17.10. RZWQM

(D.G. Decoursey, K.W. Rojas, L.R. Ahuja, 1988 et 1992)

Root Zone Water Quality Model est un modèle utilisant les processus physiques qui simulent le mouvement de l'eau, des nutriments et des pesticides à travers la zone racinaire à un endroit représentatif du terrain. L'utilisation de ce modèle a montré la nécessité de l'évaluation des propriétés du sol et leur relation avec l'écoulement dans les macropores.

1.4.17.11. SESOIL

(M. Bonazountas, J. Wagner, 1984)

Seasonal Soil Compartment est un modèle qui a été développé pour la simulation à long terme de l'environnement hydrologique, des sédiments et du devenir des polluants. Le modèle

peut décrire le transport de l'eau, des polluants et leur transformation, la qualité du sol, la migration des polluants jusqu'à l'eau souterraine et autres processus.

1.4.17.12. VIP

(J.E. McLean, R.C. Sims, W.J. Doucette, C.R. Caupp, W.J. Grenny, 1988)

Ce modèle propose des algorithmes de solution numériques et de cinétique pour décrire le comportement des pesticides dans la zone non-saturée et pour prédire le transport de masse des pesticides de l'atmosphère à l'eau souterraine.



ANNEXE II

Synthèse des méthodes de vulnérabilité - leurs applicabilités et leurs particularités.



Les méthodes de vulnérabilité intrinsèques
(Adapté et modifié de EPA, 1993 et F. Aubre, 1992)

Méthodes	Références	Milieu	Limitations	Particularité	Exemples d'applications
<i>aquifer vulnerability index</i>	Lemme, Carlson, Dean et Khakural, 1989	Aquifères granulaires et rocheux mais la présence de sol est préférable	Non évaluée.	Les paramètres pris en compte sont la matière organique, l'épaisseur du sol et la perméabilité	
<i>AVI</i>	Van Stempvoort, Ewert Wassenaar, 1991	Aquifères granulaires. Milieu confiné (premier rencontré verticalement) ou non. L'aquifère est défini comme une unité d'au moins 0.6m d'épaisseur.	Non évaluée.	La vulnérabilité est évaluée avec un facteur théorique: la résistance hydraulique qui évalue la résistance d'un aquitard au flux vertical. Les intervalles de vulnérabilité sont basés sur le log de ce facteur.	Colombie Britannique
<i>méthode modifiée de Civita</i>	Civita		Non évaluée.	Permet d'inclure l'analyse de risque.	
<i>DRASTIC</i>	Aller et al., 1987	Aquifères granulaires, aquifères rocheux peu ou pas fracturés, nappe libre ou confinée	Réalisation de deux cartes différentes pour les aquifères de surface et les aquifères confinés. Certains paramètres tels que la profondeur à la nappe sont peu représentatifs de la région du Québec.	Applicable à l'échelle régionale pour l'évaluation de la vulnérabilité spécifique aux pesticides. Redondance de certains paramètres.	Nombreuses régions du monde (Etats-unis, Canada, Afrique, Finlande, etc...)
<i>GOD</i>	Foster et al., 1997	Aquifères granulaires ou rocheux. milieu confiné ou non	Une seule carte réalisée avec les aquifères confinés, et de surface. Ne prend pas en compte la pente du terrain ce qui peut être en handicap en milieu rocheux.	Intéressant d'appliquer cette méthode dans le cas d'aquifères rocheux fracturés car la présence des fractures est prise en compte (facteur F ou FF en fonction de la fréquence des fractures)	Angleterre
<i>Greater Denver groundwater sensitivity assessment</i>	G. Hearne, M. Wireman, A. Campbell, S. Turner, G. Ingersoll, 1992	Evaluation de toutes les couches sans séparation par zone.	Non évaluée.	La vulnérabilité de l'aquifère le plus proche de la surface est évaluée. Les valeurs de vulnérabilité sont décrites quantitativement	Denver, USA
<i>Idaho's groundwater vulnerability project</i>	M. Rupert, T. Dace, M. Maupin, B. Wicherski, 1991	Tous les types d'aquifères. Roches prises en considération sont les coulées de lave.	Non évaluée.	Modification d'agricultural DRASTIC. Elles portent sur les sols (information plus détaillée, avec 4 sous-facteurs), l'incorporation de l'irrigation, l'élimination de la topographie, une quantité importante d'information sur la profondeur des puits. Le paramètre recharge inclut l'irrigation et l'utilisation du sol. Le découpage en catégories se fait d'après un indice de vulnérabilité versus acres de terrains.	Idaho, USA

Méthodes	Références	Milieu	Limitations	Particularité	Exemples d'applications
<i>SCAM3</i>	Zaporozec, 1985 & Sutherland et Madison, 1987	Tout type d'aquifères à partir du moment où il y a présence d'un sol.	Non évaluée.	Évalue la capacité des différents types de sol cartographiable à atténuer le mouvement des contaminants introduits à la surface. Basée sur 7 caractéristiques physiques et chimiques des sols.	
<i>SEEPAGE</i>	J.S. Moore, 1988		Non évaluée.	Paramètres considérés pour leur facilité d'utilisation. Combinaison des paramètres sélectionnés de DRASTIC et SCAM. Le poids de chaque paramètre varie selon que la source de pollution est diffuse ou ponctuelle.	
<i>Sotornikova et Vrba</i>	R. Sotornikova, J. Vrba, 1987		Non évaluée.	La fluctuation du niveau de la nappe est prise en compte.	
<i>WISM</i>	Schmidt, 1987		Non évaluée.	Cartes au 1/100 000 à l'échelle de l'état ou du conté. Les ressources caractéristiques sont sélectionnées selon leur importance dans le contrôle du mouvement de l'eau vers la nappe ou selon leur disponibilité. Le poids de chaque paramètre est basé sur la profondeur au roc.	
<i>Méthode Roeser</i>	Roeser, 1990	Seuls les aquifères principaux sont pris en compte.	Non évaluée.	Un seul paramètre est pris en compte: la profondeur de la couverture protectrice au dessus de l'aquifère principal. Les intervalles pour définir les zones de vulnérabilité sont définis arbitrairement.	
<i>Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en Belgique</i>	P. De Smedt, 1987	Aquifères granulaires, pour les aquifères rocheux la dénomination se limite aux "chalk, limestone, sandstone et marl". Le choix des formations de couverture se limite à : aucune, formation loameuse ou formation argileuse.	Non évaluée.	La carte de vulnérabilité montre le degré de risque de contamination des eaux souterraines dans les aquifères supérieurs.	Belgique

	Méthodes	Références	Milieu	Limitations	Particularité	Exemples d'applications
méthode cartographique	<i>Albinet et Margat</i>	M. Albinet & J. Margat, 1970	Tous les types d'aquifères.	Non évaluée.	Utilise autant de paramètres que nécessaire à une bonne estimation de la vulnérabilité. L'échelle est définie en fonction du territoire à couvrir et de l'objectif de la carte (pour la France: 1/1 000 000, 1/250 000, 1/50 000)	France
	<i>Leachability classes of kansas soils</i>	D.E. Kissel, O.W. Bidwell, J.F. Kientz, 1982	La présence de sol est souhaitable.	Non évaluée.	La vulnérabilité est basée sur la texture du profil de sol et sur le taux d'infiltration de l'eau. La méthode regroupe les sols du Kansas en 4 classes de vulnérabilité. Plus la quantité de sable est importante plus la vulnérabilité est importante.	Kansas, USA
	<i>Méthode du département des ressources naturelles du Minnesota</i>	F. Bergsrud et al., 1991	Tous les types d'aquifère: milieux granulaires ou rocheux. Aquifères confinés ou non	Réalisation de plusieurs cartes superposables. ne prend pas en compte la pente du terrain	Réalisation d'une carte avec peu de données. mise à jour de la carte de vulnérabilité au fur et à mesure de la disponibilité des données par réalisation de cartes superposables à la première. réalisation d'une carte spécifique aux aquifères confinés.	Minnesota, USA
	<i>Potential for contamination of shallow aquifer in illinois</i>	R.C. Berg, C.C. Abert, 1984	Les aquifères de surface.	Non évaluée.	À l'origine, il s'agit d'un modèle développé pour protéger les eaux souterraines d'éventuelles contaminations aux nitrates et pesticides. Le modèle peut être divisé en deux groupes: un modèle de transport de soluté et un modèle de cartographie. Réalisation de deux cartes.	Illinois, USA
	<i>Wisconsin's groundwater management plan</i>	R. Schmidt, 1987	Tous les types d'aquifères. Prend en compte le type de socle mais pas la fracturation.	Non évaluée.	Le poids de chaque paramètre est affecté en fonction des caractéristiques du milieu. En plus du niveau de la nappe les caractéristiques nécessaires sont celles du type de sol, de dépôts de surface et de socle.	Wisconsin, USA

	Méthodes	Références	Milieu	Limitations	Particularité	Exemples d'applications
méthode analytique	<i>Wisconsin's soil attenuation potential</i>	K.J. Cates & F.W. Madison, 1990	Présence de sol. Évaluation de la vulnérabilité sur une ferme.	Non évaluée.	La méthode évalue le potentiel d'atténuation des sols dans des contés sélectionnés du Wisconsin. La méthode inclue les matériaux géologiques de surface et la profondeur à la nappe pour l'évaluation au niveau des fermes. Échelle de la carte: 1/100 000	Wisconsin, USA
	<i>Assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area as indicators</i>	L. Maxe, P-O Johansson, 1998	Ne prend pas en compte le roc comme matériel de surface.	Non évaluée.	Carte de vulnérabilité à 4 niveaux en fonction du type de dépôts de la zone non saturée. Établissement de la vulnérabilité de l'eau souterraine aux liquides déversés, de la vulnérabilité aux contaminants transportés par la recharge naturelle et de la vulnérabilité en zones sans profil de sol ou pour des émissions sous la surface du sol.	
	<i>AQUIPRO</i>	R.N. Passero et al., 1988	Aquifères où il y a présence de puits individuels. Méthode développée pour les aquifères glaciaires du Sud du Michigan	Non évaluée.	Utilisable pour la contamination de surface. Méthode basée sur l'estimation que les argiles et les sédiments glaciaires argileux offrent une protection naturelle aux aquifères glaciaires. Les informations utilisées sont celles relatives aux logs de forage des puits. Les estimations faites sont incorporées dans un algorithme qui calcule un indice relatif pour chaque puits analysé. Les indices sont combinés en groupes de risque en fonction de la protection du puits.	Michigan, USA

Méthodes	Références	Milieu	Limitations	Particularité	Exemples d'applications
<i>Assessing hydrogeologic risk over large areas</i>	M.D. Trojan, J.A. Perry, 1988		Non évaluée.	Méthodes dont la détermination des indices est fonction des Etats. La méthode fonctionne par contours	
<i>EVARISK</i>	Banton et al., 1997	Aquifères granulaire: confiné ou non.	Seul le premier mètre de sol est pris en compte pour l'établissement de la vulnérabilité, le reste étant considéré comme de l'écoulement et du transport de contaminant. méthode s'appliquant ponctuellement.	Méthode de vulnérabilité spécifique à quatre groupes de contaminants mais pouvant s'appliquer comme méthode de vulnérabilité intrinsèque et à une échelle régionale.	Québec.
<i>SEEP/W</i>	GEO-SLOPE	Milieu confinés ou non.	Non évaluée.	Logiciel d'éléments finis permettant l'analyse des problèmes de déperdition de l'eau souterraine et de dissipation de la pression dans les pores. Permet une estimation du flux en régime permanent et transitoire, en 2 et 3 dimensions.	

Les méthodes de vulnérabilité spécifiques
(Adapté et modifié de EPA, 1993 et F. Aubre, 1992)

méthode	référence	type de contaminant	Type de méthode	applicabilité (quantité de données, complexité, coût)
<i>Bachmat et collin</i>	Bachmat & Collin, 1987	divers (sources ponctuelles)	Méthode numérique. Permet d'évaluer une quantité d'eau souterraine devenue impropre à la consommation.	Indicateur de pollution obtenu grâce à une équation fonction de l'augmentation de la concentration et de la masse du contaminant à la source, le temps de parcours du contaminant jusqu'à la nappe, la variation de l'activité humaine responsable, la fraction du contaminant disparue dans la zone non saturée, le temps écoulé depuis l'application initiale du contaminant, l'épaisseur de la zone de mélange et la porosité de cette zone.
<i>Carter et Palmer</i>	Carter et palmer, 1987	nitrates (sources diffuses)	Permet d'évaluer un indice de vulnérabilité (matriciel) en fonction de deux facteurs.	Nécessite deux paramètres: la détermination d'une côte du sol élaborée en fonction de la quantité de Carbone Organique présente, et le type d'aquifère (roc ou aquifère confiné)
<i>CHEMRANK</i>	D.L. Nofziger, P.S.C. Rao, A.G. Hornsby, 1988	Produits chimiques organiques (pesticides)	Modèle interactif pour micro-ordinateur. 4 schémas d'utilisation dont deux basés sur la quantité de produits chimiques qui peut se retrouver dans la zone vadose et deux qui utilisent les caractéristiques de mobilité et dégradation des produits chimiques.	requiert beaucoup de données comme le contenu en eau du sol, le contenu en carbone organique, les précipitations, l'évapotranspiration journalière, l'infiltration journalière, le nombre d'horizons, le coefficient de partition octanol/eau, la demie-vie du pesticide etc.
<i>CMLS (Chemical Movement in Soils)</i>	D.L. Nofziger, A.G. Hornsby, 1987	pesticides	Le modèle inclus des graphiques. Il permet le calcul de la quantité de pesticides libéré à partir de 60 cm sous la zone racinaire à n'importe quel temps donné.	ne nécessite que trois facteurs: la demie-vie de dégradation, les coefficients de partition et les précipitations. Il est possible de les intégrer pour chaque horizon de sol (jusqu'à 20). Le modèle requiert des valeurs de précipitations journalières.

méthode	référence	type de contaminant	Type de méthode	applicabilité (quantité de données, complexité, coût)
<i>EVARISK</i>	O. Banton et al., 1997	pesticides, fertilisants, hydrocarbures, sels de déglçage	Modèle de simulation qui permet de déterminer la quantité de contaminants qui arrive à la nappe après un temps déterminé par l'utilisateur.	Méthode ponctuelle. Il s'agit de choisir le contaminant, donner la quantité appliquée etc. et ce pour chaque année prise en compte. Les caractéristiques de la végétation présente (taille des racines en début de saison et en fin de saison etc.) doivent être connues ainsi que les caractéristiques du sol (quantité de matière organique pour chaque horizon de sol)
<i>EXPRES v 2.2 pour MS DOS</i>	National Water Research Institute Software, 1997	pesticides	Système expert. Il incorpore deux modèles de simulation: PRZM et LEACHM et un modèle de visualisation: LP/LI. Les résultats sont sous forme de graphes, de tableaux et des informations sont données sur le contaminant etc..	Il contient une banque de données des propriétés chimiques et environnementales de 175 pesticides, et un banque de données des conditions des eaux souterraines, des propriétés du sol etc... de 22 grandes régions agricoles du Canada. Il est possible d'étendre cette base de données à des contrées extérieures au Canada.
<i>Farm-A-Syst</i>	Cates & Madison, 1991	divers (aide à protéger la qualité des eaux souterraines au niveau de fermes individuelles)	Le système consiste en 12 feuilles de travail qui examinent les pratiques fermières et les caractéristiques physiques d'un site en particulier (ferme). La onzième feuille permet de calculer un risque de contamination associé aux sols et matériaux géologique de chaque ferme.	Le résultat est un indice de susceptibilité calculé à partir de deux indices: un indice relatif aux caractéristiques du sol (basé sur SCAM3) et un indice relatif au matériaux géologiques et de formations superficielles. À chacun de ces deux indices est attribué un poids avant le calcul de l'indice final.
<i>FLANDRES</i>	Ministère de la Communauté Flemish	nitrate (sources diffuses)	Permet d'évaluer un indice de vulnérabilité en fonction de trois facteurs.	Nécessite des paramètres généraux tels que le matériau de l'aquifère, les matériaux de surface et l'épaisseur de la zone vadose.

méthode	référence	type de contaminant	Type de méthode	applicabilité (quantité de données, complexité, coût)
<i>GLEAMS</i>	R.A. Leonard, W.G. Knisel, 1988	pesticides	Le modèle permet d'évaluer les effets des pratiques agricoles sur le transport des pesticides dans la zone racinaire. Le modèle résout une équation unidimensionnelle en régime transitoire pour le transport de soluté. Il permet également de calculer le mouvement et la transformations des substances nutritives.	Le modèle incorpore les précipitations, le "runoff", l'infiltration, les plantes, la demi-vie des pesticides, le coefficient de partition/volatilisation du pesticide.
<i>groundwater contamination site ranking methodology</i>	Olivieri, Eisenberg, Cooper, 1986	divers (sources ponctuelles)	Le résultat est une valeur de risque à un type de contaminant, mais c'est l'utilisateur qui choisit le contaminant et attribue les cotes en fonction des caractéristiques du contaminant choisi. La méthode permet d'évaluer un indice de risque par addition des cotes de 24 facteurs.	Les facteurs sont regroupés en deux grands groupes, les caractéristiques du site et la sévérité de la contamination. Pour les caractéristiques du site les facteurs à prendre en compte sont séparés en 3 sous-groupes, la distance du site aux points de captage (la cote est maximale si l'aquifère est contaminé), l'utilisation de l'eau souterraine et la profondeur à la nappe, perméabilité et gradient hydraulique. Pour la sévérité de la contamination, 3 sous-groupes sont à prendre en compte, la toxicité du contaminant, les propriétés physico-chimiques du contaminant et le degré de contamination.
<i>Groundwater contamination likelihood</i>	Rao et al., 1985	pesticides (méthode calculant le lessivage des pesticides)	La méthode permet le calcul d'un indice numérique continu par un modèle exponentiel multiplicatif.	Cette méthode est basée sur les paramètres relatifs aux pesticides et sur ceux relatifs à l'horizon de surface de sol.

méthode	référence	type de contaminant	Type de méthode	applicabilité (quantité de données, complexité, coût)
<i>GUS (Groundwater Ubiquity Score)</i>	D.I. Gustafson	pesticides (sources diverses)	La méthode calcule un indice GUS basé sur une courbe ajustée en fonction de la demie-vie du contaminant et les valeurs du coefficient de partage entre le carbone organique du sol et de l'Eau (Koc). Le résultat est une probabilité d'infiltration (3 classes)	Le système GUS est une échelle continue qui divise les pesticides 3: les non-lessivés, les pesticides de transitions et les lessivés. Une zone est désignée sur l'échelle GUS pour chaque classe de pesticide.
<i>HEI</i>	Heij, 1987	divers (sources diverses)	La méthode permet le calcul d'un indice de risque. Permet une évaluation de la vulnérabilité spécifique à un contaminant choisi par l'utilisateur. L'évaluation de la vulnérabilité est subjective dans le cas de cette méthode.	Les facteurs pris en compte sont l'efficacité des mesures de protection, les sources de contamination et les sources potentielles de contamination à l'intérieur des zones de recharge de la station de pompage et la capacité d'atténuation du milieu.
<i>hydro-quebec</i>	Hydro-Québec, 1987	Hydrocarbures (sources ponctuelles)	La méthode permet de déterminer un risque de pollution. Calcul à partir d'une équation mathématique dépendant de 8 facteurs. Elle nécessite une évaluation de la vulnérabilité intrinsèque.	L'évaluation se fait en fonction de la sensibilité du milieu (distance du site aux habitations, ruisseaux et fossés etc.), de la vulnérabilité des terrains (fonction de l'infiltration, de la pente et du degré d'étalement)
<i>Jury's Benchmark approach</i>	W.A. Jury, W.F. Spencer, W.J. Farmer, 1983 et 1984	pesticides (méthode calculant le lessivage des pesticides)	IL s'agit d'une série d'indices pour classer les pesticides en fonction de leur potentiel de volatilisation, de lessivage et de dégradation dans le sol.	Les indices permettent de définir la diffusion et la vitesse de convection relatifs pesticides et aux facteurs climatiques et hydrogéologiques.
<i>LEACH</i>	D.A. Laskowski, C.A.i. Goring, P.J. McCall, R.L. Swann, 1982	produits agro-chimiques (pesticides) (méthode calculant le lessivage des pesticides)	Le résultat est une fraction qui réfère à un graphique afin de déterminer le pourcentage de contaminant appliqué qui atteindra la nappe en fonction du temps.	L'approche de la méthode incorpore les effets de la solubilité des pesticides et de la persistance sur le lessivage. Elle prend en compte 4 propriétés chimiques des pesticides: la masse par volume, la demie-vie de dégradation, la pression de vapeur, le coefficient de sorption.

méthode	référence	type de contaminant	Type de méthode	applicabilité (quantité de données, complexité, coût)
<i>LEACHM</i>	J.L. Hutson, R.J. Wagenet, 1992	pesticides (zone non saturée)	Modèle de simulation par différence finie pour déterminer le devenir des pesticides dans la zone non saturée.	LEACHM est le seul modèle unidimensionnel de la zone non-saturée généralement disponible qui résout l'équation d'équilibre de l'eau par l'équation de Richard.
<i>Legrand</i>	Legrand, 1983	déchets variés (sources ponctuelles)	Méthode permettant l'établissement d'un indice de qualité et d'un risque. Cette méthode comporte trois parties, une partie évaluation du site, une partie évaluation du danger de contamination qui incorpore un volet évaluation de la vulnérabilité, et une partie évaluation du risque.	La partie évaluation du site nécessite estimation de 8 facteurs, la procédure est similaire à celle de la méthode LSR, le résultat est une suite 8 indices en commençant par l'indice de qualité. La partie évaluation du danger incorpore un volet évaluation de la vulnérabilité et un volet dangerosité des contaminants. La partie évaluation du risque compare l'indice de qualité du site et le danger de contamination.
<i>Site (surface) impoundment assessment ou legrand modifiée</i>	US EPA, 1979	divers (sources ponctuelles)	Le résultat est un indice de qualité. La particularité de cette méthode est qu'elle inclut un degré de confiance. Le résultat final est l'énumération des cotes accordées à chaque étape (7 au total)	5 paramètres sont utilisés et 7 étapes nécessaires à leur élaboration. Il s'agit de la zone non saturée, la disponibilité de l'eau souterraine, qualité de l'eau souterraine, déchets, indice de qualité du site, danger potentiel face aux points d'approvisionnement en eau, degré de confiance.

méthode	référence	type de contaminant	Type de méthode	applicabilité (quantité de données, complexité, coût)
<i>LSR (Landfill site raking)</i>	Legrand, Brown, 1977	déchets liquides (sources ponctuelles)	Le résultat est un indice de qualité. Le résultat final est obtenu en listant la cote de chaque étape en débutant par l'indice de qualité.	8 indices sont établis; la distance au point de captage d'eau souterraine la plus proche, la profondeur à la nappe, le gradient hydraulique, la perméabilité et atténuation des matériaux, l'indice de qualité du site, la sensibilité de l'aquifère, le degré de confiance des paramètres, une cote pour des situations variées (risque pour l'eau de surface, zone de recharge etc.)
<i>MOUSE</i>	S. Pacenka, 1984	pesticides	Modèle de simulation. MOUSE est un ensemble de modèles mathématiques pour le traçage du transport et devenir des pesticides dans les zones saturée et non-saturée.	MOUSE est composé de 4 sous-modèles: un générateur de données climatiques, un modèle permettant la répartition d'eau dans la zone vadose, un modèle pour le transport de soluté dans la zone vadose et un modèle pour le transport de soluté et pour l'eau de l'aquifère.
<i>OPUS</i>	V.A. Ferreira, R.E. Smith, 1988	pesticides	Il s'agit d'un modèle de simulation pour les systèmes agricoles. Le modèle simule l'érosion hydrogéologique relative et le résultat du devenir des produits chimiques selon des scénarios de gestions et de climats divers. Le but du modèle est de fournir des réponses relatives à diverses pratiques de gestion.	Les données à fournir incluent la topographie, le sol, le climat, les conditions initiales et les pratiques de gestion. Le modèle OPUS inclut l'hydrologie, l'érosion, la gestion, la croissance des récoltes, et les produits chimiques agricoles. OPUS génère des fichiers de sorties spécifiés par l'utilisateur.

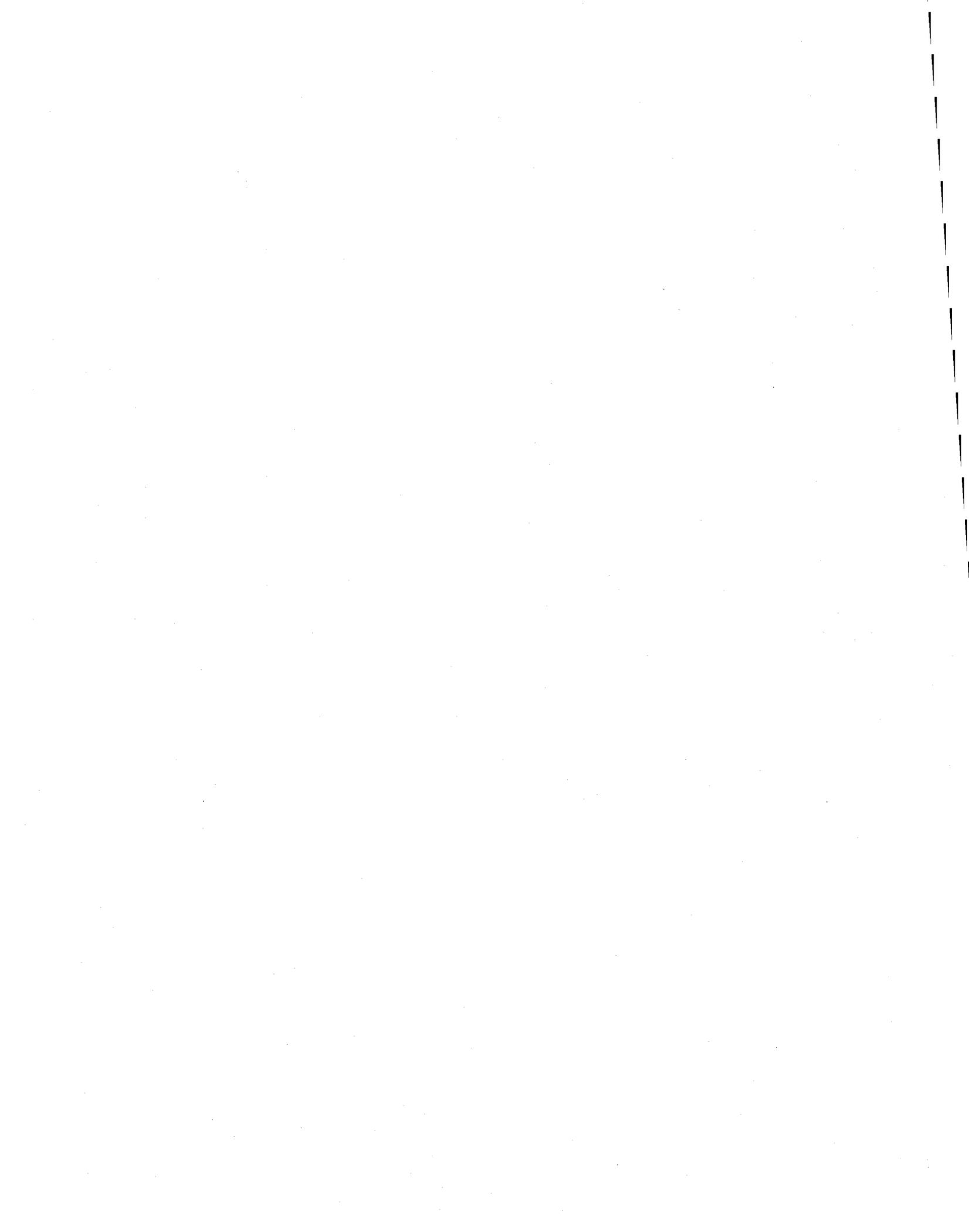
méthode	référence	type de contaminant	Type de méthode	applicabilité (quantité de données, complexité, coût)
<i>Ostry et al.</i>	Ostry, Leech, Cooper et Rannie, 1987	produits agro-chimiques (sources diffuses)	Détermination d'une vulnérabilité élevée si trois facteurs sont rencontrés.	Les conditions d'une forte vulnérabilité sont la nature des matériaux de surface (sable et gravier en surface, roc à moins de 10m, matériaux inconnus ou indifférenciés à l'échelle de la carte), contenu en matière organique inférieure à 4%, ressources alternatives d'eau souterraines non disponibles (débit < 0.2 L/s) ou non identifiées
<i>PARSONS</i>	Parsons, 1988	divers (sources ponctuelles)	Système expert. Défini un facteur d'activité en fonction de deux évaluations: l'évaluation de la vulnérabilité et l'évaluation du danger.	L'évaluation de la vulnérabilité nécessite la connaissance de la profondeur à la nappe, de la recharge nette, des matériaux de surface et de la transmissivité. L'évaluation du danger nécessite la connaissance de la distance du site à un puits, la quantité de déchets, la toxicité du contaminant le plus dangereux et la perception de la population face au site.
<i>PATRIOT</i>	J.C. Imhoff, P.R. Hummel, J.W. Kittle, R.F. Carsel	Pesticides	Il s'agit d'un système de modélisation dynamique qui consiste en un modèle combiné de transport et d'écoulement (PRZM-2) avec divers éléments.	le modèle intègre les bases de données des précipitations, les propriétés du sol, les propriétés des pesticides et les pratiques agricoles, la gestion de base de données, les paramètres d'estimation de rétention d'eau du sol, les procédures de classements pour comparer le potentiel de lessivage de diverses combinaisons des matériaux géologiques de la surface à la nappe.

méthode	référence	type de contaminant	Type de méthode	applicabilité (quantité de données, complexité, coût)
<i>PESTANS I et II</i>	C.G. Enfield, R.F. Carsel, S.Z. Cohen, T. Phan, D.M. Walters, 1982	Pesticides	Ce sont tout deux des modèles de simulation. PESTANS I est un modèle unidimensionnel en régime permanent limité à l'évaluation de l'écoulement vertical dans la zone non-saturée. PESTANS II est un modèle numérique transitoire bidimensionnel qui prédit l'écoulement vertical et horizontal de l'eau et des pesticides.	PESTANS I requiert peu de données mais la vitesse de recharge nette est difficilement évaluable. PESTANS II requiert plus d'informations hydrogéologiques, est plus complexe à faire tourner et nécessite un temps de calcul plus long. Il permet à l'utilisateur de faire varier le taux de dégradation et l'adsorption du sol avec la profondeur.
<i>Pesticide Root Zone Model (PRZM)</i>	R.F. Carsel, L.A. Mulkey, M.N. Lorber, L.B. Baskin, 1985	Pesticides (sources diffuses)	PRZM est un modèle de transport de pesticides unidimensionnel, dynamique, continu, mécanistique. Le modèle fournit des concentrations de masses de pesticides exprimées en flux ou en quantités accumulées de pesticides quittant le milieu à une profondeur définie.	PRZM requiert deux fichiers d'entrée: l'un pour les informations sur l'hydrologie, les récoltes, les pesticides et les sols; l'autre pour les informations météorologiques journalières.
<i>PRZM-2</i>	J.A. Mullins, R.F. Carsel, J.E. Scarbrough, A.M. Ivery, 1993	Pesticides	Il s'agit d'un modèle de simulation qui est l'union de PRZM et VADOFT. VADOFT étant un modèle de transport et d'écoulement unidimensionnel par éléments finis. Il simule le mouvement de l'eau dans le profil de sol, de la base de la zone racinaire au sommet de la nappe.	Le modèle prend en compte: les pratiques agricoles, le type de culture, la sorption et dégradation des pesticides, les précipitations, la morphologie du sol et les caractéristiques de rétention d'eau du sol.
<i>Root Zone Water Quality Model (RZWQM)</i>	D.G. DeCoursey, K.W. Rojas, 1988	Pesticides	Il s'agit d'un modèle de processus physiques qui simule le mouvement de l'eau, des éléments nutritifs et des pesticides sur et à travers la zone racinaire en une localisation représentative.	Le modèle simule divers processus: des processus physiques (hydrologie/hydraulique de l'eau, transport de soluté), les éléments nutritifs, les pesticides, la croissance des plantes, la gestion et la chimie du sol. L'utilisation du modèle a révélé la nécessité d'une évaluation des propriétés du sol et leur relation dans l'écoulement dans les macropores.

méthode	référence	type de contaminant	Type de méthode	applicabilité (quantité de données, complexité, coût)
<i>SESOIL</i>	M. Bonazountas, J. Wagner, 1984	Pesticides	SESOIL est un modèle de simulation environnemental à long terme des phénomènes hydrologiques, sédimentaires et du devenir des polluants. Le modèle simule les processus de transport et de devenir de produits chimiques L la volatilisation, le lessivage, l'hydrolyse et la biodégradation.	Les caractéristiques physiques sont séparées en 4 couches de sol insaturées distinctes, chacune ayant des propriétés uniformes.
<i>site rating system</i>	Hagerty, Pavoni et Heer, 1973	déchets dangereux (sources ponctuelles)	Le résultat consiste en deux indices: un indice d'évaluation du site et un indice d'évaluation des déchets	L'indice d'évaluation du site intègre des caractéristiques relatives au sol à l'eau souterraine et à l'air. L'indice d'évaluation des déchets intègre des caractéristiques relatives à la toxicité humaine, la toxicité dans l'eau souterraine, le potentiel de transmission de maladies, la persistance biologique, la mobilité des déchets.
<i>Site Rating Methodology (SRM)</i>	Kufs, Twedell et al., 1980	déchets dangereux (sources ponctuelles)	Le résultat est un niveau de risque en pourcentage.	Il y a 4 sous groupes de facteurs à prendre en compte: le milieu récepteur, le vecteur de contamination, les caractéristiques des déchets, la gestion des déchets.
<i>VIP</i>	J.E. McLean, R.C. Sims, W.J. Doucette, C.R. Caupp, W.J. Grenney, 1988	pesticides	Il s'agit d'un modèle de simulation. Le modèle donne des algorithmes de solution numérique et de cinétique non équilibrée pour décrire le comportement des pesticides dans la zone non saturée et prédire le transport de masse des pesticides dans l'atmosphère et l'eau souterraine.	

méthode	référence	type de contaminant	Type de méthode	applicabilité (quantité de données, complexité, coût)
VULPEST	J.P. Villeneuve, O. Banton, P. Lafrance, 1987 et 1990	Pesticides	Il s'agit d'un modèle de simulation qui utilise l'équation de dispersion advective et l'approche stochastique de Monté Carlo pour évaluer la contamination des eaux souterraines par les pesticides. VULPEST permet une meilleure utilisation des pesticides en association avec le schéma de protection des eaux souterraines.	Les résultats obtenus avec VULPEST incluent les concentrations maximales, les concentrations annuelles moyennes et la masse cumulative pour chaque simulation Monté Carlo.
WSS (waste soil site interaction matrix)	Phillips, Nathwani et Mooij, 1977	déchets industriels (sources ponctuelles)	Le résultat est un indice, résultant de la multiplication de deux indices: un indice relié au déchets et un indice relié au sol et au site.	Les facteurs utilisés sont: pour l'indice relié aux déchets, la toxicité humaine, la toxicité dans l'eau souterraine, le potentiel de transmission de maladies, la persistance chimique, la persistance biologique, l'adsorption, la viscosité, la solubilité, l'acidité/basicité, le taux d'application des déchets. Pour l'indice relié au sol et au site, la perméabilité du sol, l'atténuation, la profondeur à la nappe, le gradient hydraulique, l'infiltration, la distance du puits au point d'approvisionnement en eau le plus près, l'épaisseur des matériaux non consolidés.

ANNEXE III
Comparaison des paramètres



(1) Variations dans l'évaluation des paramètres de la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987) et de la méthode développée par le département de la santé et du bien-être de l'Idaho (Rupert, 1991)

- ✓ Le système de cotation n'est pas le même, la cote maximale de DRASTIC est de 10 alors que pour la méthode de l'Idaho elle peut être jusqu'à 5 fois plus importante. Les écarts entre chaque classe sont ainsi plus importants si on effectue un calcul de proportionnalité (en divisant la valeur de l'indice de la méthode d'Idaho par 5).
- ✓ DRASTIC utilise un système de poids pour chaque paramètre, alors que la procédure de la seconde méthode ne consiste qu'en l'addition des indices ramenée sur 100.
- ✓ En ce qui concerne le paramètre profondeur à la nappe, DRASTIC utilise un découpage de 7 classes alors que la seconde méthode utilise 5 classes. Pourtant la méthode de l'Idaho est moins sensible que la méthode DRASTIC car la profondeur au-dessus de laquelle la cote est maximale est plus de deux fois supérieure, et les indices sont, à une profondeur donnée, plus forts pour la méthode de l'Idaho (Tableau 1).
- ✓ Pour le paramètre recharge, la méthode DRASTIC utilise la valeur approximée de la quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol pour la détermination des cotes, alors que la méthode de l'Idaho utilise trois informations en une : la première information est l'utilisation du territoire, la seconde est la présence de terres de culture (irriguées ou sèches) et la troisième la différence entre l'irrigation par gravité et l'irrigation par rampe d'arrosage. Ces trois informations sont reliées à l'activité humaine. Ainsi le paramètre recharge de la méthode de l'Idaho correspond en fait à un paramètre qui pour certaines méthodes telles que la méthode EVARISK (Banton *et al.*, 1997) correspondra, au paramètre utilisation du sol en ce qui concerne l'information de base, mais pas la manière de traiter cette information (Tableau 2).
- ✓ Enfin, en ce qui concerne le paramètre sol, la méthode DRASTIC assigne des cotes en fonction du type de matériel, alors que la méthode de l'Idaho les assigne en fonction des propriétés relatives à chaque type de sol. Ainsi la méthode DRASTIC basée sur des évaluations empiriques peut présenter des variations si les caractéristiques de la zone étudiées ne correspondent pas à celles utilisées pour la mise en place du système de cotation de la méthode. Mais d'un autre côté, la

méthode de l'Idaho fait intervenir une notion de subjectivité importante puisque c'est l'utilisateur qui choisi d'assigner une cote plus ou moins forte selon ce que lui estime être un sol plus ou moins perméable ou encore une fréquence d'irrigation importante etc. Et ainsi une même zone cartographiée par deux personnes différentes sera plus variable pour ce paramètre en utilisant la méthode Idaho qu'en utilisant la méthode DRASTIC.

Profondeur à la nappe			
DRASTIC		Méthode de l'Idaho	
<i>Profondeur (m)</i>	<i>Cote</i>	<i>Profondeur (m)</i>	<i>Cote</i>
de 0 à 1.5	10	de 0.3 à 7.6	50
de 1.5 à 4.5	9	de 7.9 à 15.2	35
de 4.5 à 9	7	de 15.5 à 30.5	20
de 9 à 15	5	de 30.8 à 76.2	10
de 15 à 23	3	> à 76.2	1
de 23 à 31	2		
> à 31	1		
Recharge			
DRASTIC		Méthode de l'Idaho	
<i>Intervalles de valeurs (cm/a)</i>	<i>Cote</i>	<i>Classes de recharge</i>	<i>Cote</i>
de 0 à 5	1	irrigation des terres par gravité	50
de 5 à 10	3	zones riveraines	50
de 10 à 18	6	terrains irrigués par rampes d'arrosage	40
de 18 à 25	8	forêts	30
> 25	9	agriculture des terres arides	20
		prairies	20
		roche à nu (coulée de lave)	10
		zones urbaines	ss poids
		eau de surface	ss poids
Sol			
DRASTIC		Méthode de l'Idaho	
<i>matériel</i>	<i>Cote</i>	<i>propriétés</i>	<i>Cote</i>
mince ou absent, gravier	10	perméabilité de la plus restrictive des couches	2 à 20
sable	9	profondeur à la nappe dans l'horizon de sol	1 à 10
matériau organique (tourbe)	8	profondeur au bedrock	0 ou 8
argile fissurée ou agglomérée	7	fréquence d'irrigation	0 à 5
loam sableux	6	Total :	2 à 43
loam	5		
loam limoneux	4		
loam argileux	3		
matériau organique (terre noire)	2		
argile intacte	1		

Tableau 1 : Comparaison des paramètres communs à DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) et la méthode développée dans l'Idaho (Rupert *et al.*, 1991).

(2) Similitudes entre le paramètre recharge de la méthode Idaho et le paramètre utilisation du sol de la méthode EVARISK

Le système de cotation est différent, mais les caractéristiques prises en compte sont semblables. Bien que le paramètre recharge de la méthode Idaho prend en compte de manière implicite la quantité d'eau.

<i>Utilisation du territoire</i>			
EVARISK		Paramètre recharge de la méthode Idaho	
<i>Informations demandées</i>	<i>Processus et formules utilisés</i>	<i>Classes de recharge</i>	<i>Cote</i>
Date de début d'émergence du type de plante	Prélèvement d'eau par la végétation intervenant dans le calcul du bilan d'eau	irrigation des terres par gravité	50
		zones riveraines	50
Date de fin d'émergence	$F(x) = 1 / (1 + \exp(-1.5976 * z * (1 + 0.04417 * z)))$	terrains irrigués par rampes d'arrosage	40
Profondeur de racine en début de saison	Découpage de la carte d'utilisation des sols en 4 ensembles	forêts	30
		agriculture des terres arides	20
Profondeur de racine en fin de saison	Zones urbaines (= pelouses)	prairies	20
	Zones agricoles (moyenne des cultures rencontrées)	roche à nu (coulée de lave)	10
Quantité d'eau nécessaire à la plante	Zones forestières (moyenne des types d'arbres rencontrés)	zones urbaines	ss poids
		eau de surface	ss poids

Tableau 2 : Comparaison de deux paramètres issus de deux méthodes différentes utilisant le même type d'information.



ANNEXE IV

Types de sol dans la MRC – Traitement par
EVARISK



Tableau B1 : Types de sol répertoriés



TYPE de Sol	Epaisseur (cm)	Nom	C org %	N %	Description
ACHIGAN (Rel:21) (sable fin loameux) (Dr imparfait) (engorgement printemps)	0-19	Ap	4.69	0.32	Sable fin loameux brun/ R abond/ pH:5.0
	19-25	Aegi	1.49	0.07	sable fin loameux gris rose/R abond/ pH:5.1
	25-36	Bfgi	2.58	0.18	sable fin loameux brun rouge/ R abond/ pH:4.8
	36-48	Bmg	0.55	0.03	sable jaune brun/ R peu abond/ pH:5.2
	48	Cg	0.14	0.03	sable fin gris olive/ pH:5.5
ACHIGAN (Rel:25) (loam sableux fin) (Dr imparfait) (engorgement printemps)	0-27	Ap	2.82	0.18	loam sableux fin brun/R très abond/ pH:5.5
	27-32	Aegi	0.80	0.04	sable loameux gris (humus)/R abond/ pH:5.9
	32-42	Bfgi	1.46	0.06	loam sableux fin noir/ R abond/ pH:5.3
	42-57	Bmg	0.79	0.02	loam sableux fin jaune/R peu abond/ pH:6.7
	57	Cg	0.12	0.02	loam sableux brun gris/ R très peu abond/ pH:7.0
SAINTE AGATHE (Rel: 19) (sable grossier loameux caillouteux) (Dr bon) (pente faible)	15-0	L-H	6.64	0.35	mat org demi décomposé/ R très abond/ pH:4.8
	0-10	Ae	1.11	0.09	sable grossier loameux caillouteux gris/R abond/ pH:4.6
	10-27	Bfh	4.35	0.26	loam sableux caillouteux rouge/ R abond/ pH: 4.8
	27-44	Bf	1.46	0.10	loam sableux caillouteux brun jaune/ R peu abond/ pH:5.1
SAINTE AGATHE (Rel: 38) (sable grossier loameux graveleux) (Dr bon) (pente faible)	44-59	Cgx	0.15	0.02	loam sableux très graveleux olive/ frag roche/ pH: 5.5
	5-0	L-H	13.05	0.9	mat org demi décomposé/ R très abond/ pH:4.5
	0-7	Ae	1.88	0.11	sable grossier loameux graveleux/ R très abond/ pH: 5.1
	7-21	Bfh	6.16	0.03	sable grossier loameux très graveleux/ R très abond/ pH:4.9
	21-56	Bf	0.73	0.05	sable grossier très graveleux/ R peu abond/ pH: 5.0
SAINT ANTOINE (Rel: 41) (loam sableux graveleux) (Dr excessif à bon)	56-61	C	0.15	0.04	sable loameux graveleux pierreux caillouteux/ pH:5.1
	0-20	Ap	4.30	0.33	loam sableux graveleux brun/ R très abond/ pH:6.0
	20-35	Bfh	2.80	0.15	loam sableux graveleux rouge jaune/ R abond/ pH: 6.3
	35-45	Bf	1.19	0.06	sable grossier loameux graveleux / R peu abond/ pH:6.2
BATISCAN (Rel: 18) (loam sableux fin) (Dr bon)	45	C	0.32	0.02	sable grossier graveleux/ R très peu abond/ pH: 6.2
	0-23	Ap	4.85	0.37	loam sableux fin brun gris/ R abond/ pH:6.5
	23-35	Bf	1.84	0.13	loam sableux fin brun jaune/R abond/ pH: 6.2
	35-47	Bm	0.23	0.05	loam sableux très fin olive clair/R peu abond/ pH:6.1
SAINT BERNARD (Rel: 34) (loam sableux caillouteux) (Dr bon à modéré bon)	47	Cgi	0.51	0.06	loam sableux très fin olive/ pH:5.9
	0-24	Ap	6.07	0.16	loam sableux brungris/ R abond/ pH: 7.7
	24-36	Bmk	2.28	0.21	sable loameux brun gris foncé/ R abond/ pH: 7.8
	36-60	Ck1	0.56	0.05	sable loameux brun foncé/ R peu abond/ pH: 7.9
	60	Ck2	0.27	0.04	loam sableux olive gris brun clair/ pH: 8.2
BEVIN (Rel: 23) (sable fin loameux) (Dr imparfait)	0-24	Ap	3.37	0.21	sable fin loameux brungris granu/ R très abond/ pH: 6.5
	24-28	Aegi	1.39	0.08	loam sableux fin grisrose/ R peu abond/ pH:6.5
	28-38	Bfhgi	4.70	0.17	loam sableux fin brunrouge concrétion/ R abond/ pH: 5.6
	38-54	Bfg	1.41	0.09	sable fin loameux brun vit/ R peu abond/ pH: 5.8
	54-69	Bmg	0.33	0.03	sable fin jauneroige/ pH:5.5
BOTREAU (Rel: 44) (sable loameux) (Dr imparfait à mauvais)	69	C	0.14	0.03	sable fin brun très pale/ pH:5.6
	0-24	Ap	2.03	0.10	sable loameux gris très foncé/ R abond/ pH:5.7
	24-43	Bg	0.21	0.03	sable loameux grisolive/ R peu abond/ pH: 7.6
	43-61	Ckg1	0.25	0.05	sable loameux grisolive/ R peu abond/ pH:7.8
BRANDON (Rel: 16) (loam argileux) (Dr mauvais à très mauvais)	61	Ckg2	0.35	0.03	loam sabloargileux gris/ R peu abond/ pH: 7.5
	0-20	Ap	6.24	0.30	loam argileux ;a argile limoneuse brungris/ pH:5.8-6.2
	20-45	Bg1	0.53	0.04	argile limoneuse olive taille de rouille/ pH: 6.5
	45-70	Bg2	0.53	0.04	argile grise à grisolive/ pH:6.8
BRÉBEUF (Rel: 30) (loam sableux fin) (Dr bon)	à 70	Cg	0.17	0.02	argile grise très foncé/ lits de limons/ pH:6.8-7.0
	0-19	Ap	5.40	0.66	loam sableux fin brun foncé/ R abond/ pH:5.2
	tr	Ae			loam sableux fin gris clair/ R abond/ lim interrompue
	19-50	Bf	1.87	0.09	loam sableux fin jaunebrun/ R abond/ pH:5.5
	50-80	Cg	0.18	0.03	loam sableux fin oliveclair/ R peu abond/ pH:5.9
CAP-SANTÉ (Rel: 39) (sable grossier à sable grossier loameux graveleux) (Dr excessif à bon)	à 80	11Cg	0.00	0.02	loam gris olive clair/ R très peu abond/ pH:5.9
	0-19	Ap	12.10	0.26	sablè grossier à sable grossier loameux graveleux/ R très abond/ pH:6.4
	19-22	Ae	0.49	0.04	sable grossier grisrose/ meuble/ R abond/ pH:5.8
	22-74	Bm	0.66	0.10	sable grossier graveleux/ meuble/ R peu abond/ pH:5.6
à 74	C	0.78	0.02	sable grossier graveleux/ meuble/ R très peu abond/ pH: 5.8	

CHALOUPPE (Rel: 13) (loam) (Dr imparfait)	0-16	Ap	3.77	0.38	loam brun très foncé/ R abond/ pH:6,3
	16-28	Bg	0.86	0.09	loam limoneux brunjaune/ R très peu abond/ pH:6.5
	à 28	Cg	0.23	0.05	loam limoneux grisolive clair/ pH: 6.7
CHALOUPPE (Rel: 50) (loam limoneux) (Dr imparfait)	0-19	Ap	2.04	0.10	loam limoneux brungris/ R très abond/ pH: 7.3
	19-28	Bg1	0.57	0.06	loam limoneux gris foncé/ R peu abond/ pH:7.4
	28-42	Bg2	0.39	0.05	loam sablo-argileux gris/ R peu abond/ pH:7.3
	42-58	Cg	0.34	0.04	loam sableux fin gris foncé/ R peu abond/ pH:7.6
CHAMPLAIN (Rel: 11) (loam limoneux) (Dr mauvais)	0-22	Ap	3.38	0.28	loam limoneux à demi décomposée/ R abond/ pH: 7.0
	à 22	Cg	0.37	0.05	loam sableux fin grisolive/ R peu abond/ pH: 7.3
CHAPEAU (Rel: 6) (loam limoneux) (Dr bon)	0-22	Ap	3.67	0.29	loam limoneux brun foncé/ pH: 7.8
	à 22	C	0.27	0.04	argile limoneuse brungris foncé/ pH: 6.4
CHICOT (Rel: 31) (loam) (Dr imparfait)	0-20	Ap	3.19	0.28	loam brun gris très foncé/ R abond/ pH: 5.9
	20-33	Bmg	1.52	0.13	loam brun foncé/ R peu abond/ pH: 6.0
	à 33	Ckg	0.84	0.08	loam sablo-argileux brungris/ R très abond/ pH: 7.8
DALHOUSIE (Rel: 35) (loam limoneux) (Dr imparfait)	0-18	Ap(g)	2.35	0.15	loam limoneux brun foncé/ R abond/ pH: 6.5
	18-40	Bg1	1.28	0.08	loam limoneux olive/ R peu abond/ pH: 6.3
	40-60	Bg2	0.52	0.03	loam limoneux olive/ R très peu abond/ pH: 6.3
	60-183	Cg	0.11	0.02	loam limoneux grisolive/ pH: 6.4
à 183	11Cg	0.64	0.01	loam limoneux gris/ pH: 6.8	
DELIGNY (Rel: 27) (loam sableux) (Dr imparfait)	0-20	L-H (Ap)	3.45	0.18	loam sableux et mat org à demi décomposée brunrouge foncé/ R peu abond/ pH: 4.7
	20-28	Ae	0.39	0.02	sable grossier loameux gris/ R peu abond/ pH: 4.9
	28-36	Bfg1	2.22	0.08	sable grossier loameux noir/R très peu abond/ pH: 4.8
	36-58	Bfg2	1.77	0.07	sable grossier loameux/ R très peu abond/ pH: 5.0
	à 58	Cg	0.26	0.02	sable grossier jaunebrun/ meuble/ pH: 5.1
DELIGNY (Rel: 28) (loam sableux) (Dr imparfait)	0-20	Ap (L-H)	1.41	0.05	loam sableux et mat org à demi décomposée brun foncé à gris/ R peu abond/ pH: 4.7
	20-28	Ae	0.27	0.01	sable loameux gris/ meuble/ R peu abond/ pH: 4.6
	28-36	Bfg1	2.06	0.06	sable loameux brunrouge/ meuble/ R peu abond/ pH: 4.8
	36-58	Bfg2	0.39	0.01	sable loameux rouge à brun/ meuble/ R très peu abond/ pH: 5.1
	à 58	Cg	0.19	0.02	sable grossier jaunebrun/ meuble/ pH: 5.2
SAINT-FAUSTIN (Rel: 42) (loam sableux fin graveleux et caillouteux) (Dr excessif)	0-15	Ap	7.51	0.39	loam sableux fin très graveleux et caillouteux/ R très abond/ pH: 5.1
	tr	Ae			loam sableux fin très graveleux et caillouteux
	15-23	Bfn	3.21	0.15	loam sableux très fin très graveleux et caillouteux/ R peu abond/ pH: 5.6
	23-43	Bf	1.70	0.08	loam sableux très fin très graveleux et caillouteux/ R peu abond/ pH: 5.8
	à 43	C	0.64	0.04	sable grossier très graveleux et caillouteux/ meuble/ R très peu abondantes/ pH: 5.7
GRONDINES (Rel 9) (loam limoneux) (Dr mauvais)	0-19	Ap	1.61	0.19	loam limoneux brungris/ R peu abond/ pH: 6.7
	19-51	Cg	0.37	0.06	loam brungris/ R très peu abond/ pH: 6.9
	51-90	Ckg	0.09	0.05	sable brungris/ pH: 7.5
IVRY (Rel: 36) (sable fin) (Dr excessif à bon)	0-15	Ap	2.72	0.16	sable fin brunjaune/ R très abond/ pH: 5.5
	15-37	Bf	1.31	0.06	sable fin brunjaune/ R abond/ pH: 6.0
	à 37	C	0.16	0.01	sable fin jaunebrun/ meuble/pH: 6.2
JOLY (Rel: bétair,8) (loam argileux à argile) (Dr imparfait à mauvais)	0-5	Aeg	4.9	-	argile brune à brungris/ fissures
	5-10	Bfg1	1.3	-	argile limoneuse brun pale
	10-28	Bfg2	0.7	-	loam limono-argileux gris
	28-41	Bg	0.8	-	argile limoneuse gris clair/ début stratif
	41-49	Rtjg	1.0	-	frag de schistes gris/ lits schisteux
	49-74	R (non calc)			schiste altéré brungris
SAINT-JUDE (Rel: 16) (loam sableux fin) (Dr imparfait)	0-23	Ap	3.48	0.25	loam sableux fin brungris/ R abond/ pH: 6.8
	23-36	Bfgi	1.75	0.11	sable fin loameux rougejaune/ R peu abond/ pH: 5.8
	36-55	Bmg	0.27	0.04	sable fin brunjaune/ R très peu abond/ pH: 6.1
	55-83	Cg	0.08	0.01	sable olive/ meuble/ pH: 6.6
	à 83	11Cg	0.12	0.03	loam limono-argileux/ pH: 6.5
SAINT-JUDE (Rel: 43) (sable fin) (Dr imparfait)	15-0	L-H (Ap)	3.14	0.14	sable fin, mat org à demi décomposée brungris/ R très abondantes/ pH:4.6
	0-5	Ae	0.24	0.01	sable fin gris/ R très abond/ pH: 4.7
	5-27	Bfn	7.02	0.26	sable fin brunrouge foncé/ R très abond/ pH: 4.7
	27-50	Bfgi	1.31	0.06	sable fin rougejaune/ R peu abond/ pH: 5.2
	à 65	Cgi	0.21	0.01	sable fin jaunibrun/ meuble/ pH: 5.5

LACHUTE (Rel: 29) (loam limoneux) (Dr bon)	0-22	Ap	3.25	0.18	loam limoneux brun foncé/ R abond/ pH: 6.2
	à 22	C	1.09	0.06	loam brun pale à brunjaune clair/ R peu abond/ pH: 5.7
SAINT-LAURENT (Rel: 5) (loam) (Dr imparfait)	0-18	Ap	3.14	0.21	loam brungris foncé/ R peu abond/ pH: 5.9
	18-20	Aeg	1.25	0.07	loam grisbrun clair/ pH: 5.3
	20-45	Btg	0.16	0.04	loam limoneux à loam argileux brungris à brun/ pH: 5.6
	à 45	Cg	0.13	0.03	loam limono-argileux gris/ minces lits de sables/ pH: 6.7
SAINT-LAURENT (Rel: 49) (loam argileux) (Dr imparfait)	0-23	Ap	5.88	0.22	loam argileux brun foncé/ R très abond/ pH: 4.9
	23-34	Aeg	0.67	0.03	loam sablo-argileux gris/ R très abond/ pH: 6.3
	34-51	Btg1	0.33	0.04	argile brungris foncé à brungris/ R abond/ pH: 6.8
	51-61	Btg2	0.32	0.03	argile grise/ R peu abond/ pH: 6.9
	61-82	Cg1	0.27	0.03	argile lourde brungris/ R très peu abond/ pH: 6.9 (sable altern)
	82-107	Cg2	0.25	0.03	argile lourde grise/ R peu abond/ pH: 7.2 (sable altern)
	à 107	Cg3	0.39	0.02	argile lourde grise/ R peu abond (taches olive) pH: 7.6
SAINT-LOUIS (Rel: 47) (sable) (Dr mauvais à très mauvais)	51-31	L (Ap)	54.94	1.32	mat org à demi décomposée avec débris vég non décomp/ R abond/ pH: 3.7
	31-11	F	58.44	1.24	mat org noir/ R abond/ pH: 3.8
	11-0	H	29.22	0.42	mat org bien décomposée noire/ R abond/ pH: 4.4
	0-10	Bg	14.70	0.04	sable brun foncé/ meuble/ R très peu abond/ pH: 4.9
	10-24	Cg1	0.14	0.01	sable fin gris/ meuble/ pH: 5.3
MATAMBIN (Rel: 51) (sable grossier loameux graveleux et caillouteux) (Dr imparfait)	à 85	Cg2	0.06	0.00	sable gris/ meuble/ pH: 5.1
	0-12	Ap	4.68	0.31	sable grossier loameux graveleux et caillouteux brun très foncé/ R abond et très abond (fines)/ pH: 4.7
	12-19	Ae	1.12	0.06	sable grossier loameux graveleux et caillouteux brungris/ R peu abond et très abond (fines)/ pH: 4.5
	19-39	Bhfgi1	9.35	0.35	sable grossier loameux très graveleux et caillouteux brunrouge/ R peu abond/ pH: 5.2
	39-55	Bhfgi2	8.00	0.35	sable grossier très graveleux et caillouteux brunrouge foncé/ R peu abond/ pH: 5.1
	55-70	BC	2.46	0.10	sable grossier très graveleux et caillouteux brunrouge foncé/ meuble/ R peu abond/ pH: 5.4
Mc DONALD (Rel: 52) (loam sableux) (Dr mauvais)	à 70	C	2.30	0.12	sable grossier très graveleux et caillouteux brun foncé/ meuble/ R très peu abond/ pH: 5.6
	0-18	Ap	9.31	0.82	loam sableux brunrouge foncé/ R très abond/ pH: 7.0
	18-38	Bg	0.74	0.02	sable loameux olive clair/ R peu abond/ pH: 7.6
MONT-ROLLAND (Rel: 37) (sable loameux graveleux) (Dr excessif)	à 38	Ckg	0.31	0.02	loam sableux olive/ cailloux minces/ pH: 8.0
	0-20	Ap	3.00	0.17	sable loameux graveleux / R très abond/ pH: 5.2
	20-38	Bfh	2.98	0.14	sable loameux graveleux/ R peu abond/ pH: 5.3
	38-76	Bf	0.83	0.05	sable grossier très graveleux brun foncé/ meuble/ R peu abond/ pH: 5.5
MONT-ROLLAND (Rel: 40) (sable loameux graveleux) (Dr excessif)	à 76	C	0.38	0.01	sable grossier très graveleux/ meuble/ gravier/ pH: 5.4
	4-0	L-H	18.12	1.06	mat org à demi décomposée et sable loameux brunrouge foncé/ R très abond/ pH: 4.8
	0-4	Ae	0.94	0.05	sable loameux gris/ R très abond/ gravier/ pH: 4.6
	4-34	Bfh	5.44	0.23	loam sableux grossier graveleux rougejaune/ R très abond/ gravier/ pH: 4.7
	34-66	Bf	1.47	0.06	sable grossier très graveleux brun vil/ meuble/ R peu abond/ gravier/ pH: 5.0
MORIN (rel: 2) (sable) (Dr excessif à bon)	à 70	C	0.27	0.02	sable grossier très graveleux brunjaune/ meuble/ gravier/ pH: 5.2
	0-18	Ap	1.51	0.12	sable brunrouge foncé/ meuble/ R peu abond/ pH: 6.3
	18-26	Ae	1.27	0.07	sable gris clair/ meuble/ R peu abond/ pH: 6.2
	26-34	Bf	2.20	0.13	sable brunrouge à rouge/ meuble/ R peu abond/ pH: 5.6
	34-75	Bm	0.44	0.04	sable brunjaune/ meuble/ pH: 5.3
MORIN (rel: 3) (sable) (Dr excessif à bon)	à 75	C	0.15	0.03	sable fin brun pale/ meuble/ pH: 5.3
	7-0	L-H	17.25	0.89	mat org à demi décomposée noir/ meuble/ R abond (gros)/ pH: 4.8
	0-5	Ae	1.36	0.12	sable gris/ meuble/ R peu abond et abond (fines)/ pH: 5.1
	5-23	Bfh	3.58	0.23	sable loameux à loam sableux rougejaune/ meuble/ R abond (gros) et peu abond (fines)/ concrétion/ pH: 5.6
	23-50	Bm ou Bc	0.09	0.03	sable brunjaune/ meuble/ R peu abond/ gravier/ pH: 5.2
NEUVILLE (Rel: 10) (loam sableux fin) (Dr imparfait)	à 57	C	0.33	0.04	sable grossier brun pale/ meuble/ pH: 5.0
	0-24	Ap	1.95	0.19	loam sableux fin brun/ R peu abond/ pH: 6.7
	24-41	Bg	0.21	0.03	loam sableux fin brungris/ R très peu abond/ gravier/ pH: 7.2
	à 41	Ckg	0.05	0.01	loam sableux fin très graveleux grisbrun/gravier/ pH: 7.9

PLATON (Rel: Belair, 8) (argile) (Dr très mauvais)	5-0	Oh (Ah)			masse granulaire noire et brune humifère/ R très abond/ base zone discontinue 1 à 2 cm: mull (minéralisation)
	0-5	Aeg	16.1	-	argile brunjaune clair
	5-23	Bg	2.7	-	argile limoneuse très plastique gris
	23-30	11Hf (non calc)	1.2	-	loam limoneux schisteux plastique gris et gris clair
	30-55	11RK			schiste calcaire gris foncé/ enduits calcaires
PONTIAC (Rel: 22) (loam) (Dr bon)	0-25	Ap	3.51	0.31	loam brun foncé/ R abond/ pH: 6.0
	25-33	Bm	1.13	0.10	loam brunjaune foncé/ R peu abond/ pH: 5.6
	à 33	11Cg	0.27	0.06	loam argileux brungris/ pH: 5.9
PONT-ROUGE (Rel: 45) (sable grossier) (Dr excessif à bon)	0-23	Ap	6.60	0.32	sable grossier brun foncé/ R abond/ pH: 5.4
	23-27	Ae	0.41	0.05	sable grossier gris/ meuble/ R peu abond/ pH: 4.9
	27-34	Bfh	4.13	0.17	sable grossier rouge à brunrouge/ r peu abond/ pH: 5.1
	34-40	Bf	0.86	0.05	sable grossier rouge très sombre/ meuble/ induré par humus/ R très peu abond/ pH: 4.9
	40-54	Bm	0.47	0.05	sable grossier brun vif à brunjaune/ meuble/ pH: 5.1
	54-69	BC	0.28	0.02	sable grossier graveleux brunjaune/ meuble/ gravier/ pH: 5.1
	69-89	C1	0.14	0.01	sable grossier graveleux olive/ meuble/ gravier/ pH: 5.0
	à 89	C2	0.10	0.01	sable grossier graveleux olive/ meuble/ gravier/ pH: 5.2
PONT-ROUGE (Rel: 46) (loam sableux grossier) (Dr excessif à bon)	0-20	Ap (H)	11.30	0.45	loam sableux grossier gris foncé/ R abond/ pH: 4.5
	20-25	Bfh	3.12	0.15	sable grossier brunrouge foncé/ R abond/ pH: 4.7
	25-43	Bf	1.01	0.05	sable grossier brunrouge foncé/ meuble/ induré par humus/ R peu abond/ pH: 4.8
	43-50	Bm	0.35	0.02	sable brun vif/ meuble/ R très peu abond/ pH: 4.6
	50-75	BC	0.16	0.02	sable grossier graveleux brunjaune/ meuble/ gravier/ pH: 4.7
	75-105	C1	0.21	0.01	sable grossier graveleux brunjaune/ meuble/ gravier/ pH: 4.8
	105-130	C2	0.18	0.00	sable grossier graveleux brunjaune/ meuble/ gravier/ pH: 4.9
	à 130	C3	0.29	0.00	sable gris/ meuble/ pH: 5.0
SAINT-RAYMOND (rel: 26) (loam) (Dr bon)	0-20	Ap	5.28	0.32	loam brun foncé/ R abond/ pH: 6.7
	20-36	Bf	1.56	0.10	loam brunjaune/ R peu abond/ pH: 6.3
	à 36	C	0.10	0.01	sable grossier brun pale/ meuble/ R très peu abond/ pH: 6.4
RIDEAU (rel: 20) (loam limono-argileux) (Dr modérément bon)	0-22	Ap	2.54	0.23	loam limono-argileux brungris/ R très abond/ pH: 5.6
	22-48	Cg1	0.22	0.04	loam limono-argileux brungris/ R peu abond/ pH: 6.8
	à 48	Cg2	0.14	0.03	loam limono-argileux grisolive clair/ pH: 7.4
SAINTE-ROSALIE (Rel: 14) (argile limoneuse) (Dr imparfait)	0-8	Ap	5.81	0.36	argile limoneuse brun foncé/ R peu abond/ pH: 5.2
	8-10	Aeg1	3.27	0.13	argile lourde grise/ R très peu abond/ pH: 6.1
	10-14	Bg (f)	0.69	0.06	argile brune/ R très peu abond/ pH: 6.2
	14-58	Bg	0.35	0.04	argile lourde grise/ pH: 7.0
	à 58	Cg	0.37	0.04	argile lourde grise/ pH: 7.4
SAINT-SAMUEL (Rel: 17) (sable) (Dr mauvais à très mauvais)	13-0	Om	52.31	1.60	mat org moyennement décomposée, brunrouge/ R peu abond/ pH: 5.7
	0-1	Aej			sable brun / meuble/ R peu abond
	1-20	Bg1	0.79	0.05	sable rougejaune/ meuble/ R abond/ pH: 4.5
	20-47	Bg2	0.19	0.03	sable brunjaune/ meuble/ R peu abond/ pH: 4.8
	à 60	Cg	0.16	0.03	sable brun/ meuble/ pH: 4.8
SERGENT (Rel: 53) (sable loameux caillouteux) (Dr modérément bon)	12-0	L-F-H	33.31	1.45	mat org noire/ R très abond/ gravier cailloux/ pH: 4.1
	0-13	Ae	1.16	0.06	sable loameux grisrouge/ R très abond/ gravier cailloux/ pH: 4.5
	13-25	Bhf1	8.46	0.34	sable loameux brunrouge/ r très abond/ gravier cailloux/ pH: 4.9
	25-33	Bhf2	6.55	0.27	sable grossier loameux brunrouge/ R abond/ gravier cailloux/ pH: 4.9
	33-42	Bf	0.75	0.12	sable loameux brun vif/ R abond/ gravier cailloux/ pH: 5.2
	42-70	Cgi	0.72	0.02	sable brunjaune/ meuble/ R peu abond/ gravier cailloux/ pH: 5.1
	à 82	Cg	0.29	0.01	sable brungris/ meuble/ pH: 5.2
SOREL (Rel: 8) (sable grossier loameux à sable grossier) (Dr excessif)	0-13	Ap	2.06	0.15	sable grossier loameux à sable grossier brungris/ R abond/ pH: 5.6
	tr	Ae	0.80	0.06	sable grossier gris/ meuble/ cendres/ pH: 5.0
	13-25	Bf	1.27	0.08	sable grossier rougejaune/ meuble/ R peu abond/ concrétion/ pH: 5.2
	25-57	Bm	0.16	0.04	sable grossier jaunebrun/ meuble/ R très peu abond/ pH: 5.5
	à 57	C	0.10	0.02	sable jaune/ meuble/ mica noir/ pH: 5.3

TERREBONNE (Rel: 48) (loam sableux grossier) (Dr mauvais à imparfait)	0-16	Ap	4.40	0.34	loam sableux grossier brun foncé/ R très abond/ pH: 7.2
	16-42	Bg	0.41	0.05	sable grossier loameux graveleux brungris foncé à brun/ R peu abond/ gale/ pH: 7.7
	42-70	Ckg1	0.39	0.05	loam sableux graveleux gris foncé/ gale/ pH: 8.1
	à 70	Ckg2	0.51	0.04	loam sableux graveleux gris foncé/ gale/ pH: 7.7
SAINT-THOMAS (Rel: 1) (sable loameux) (Dr bon à excessif)	0-13	Ap	1.82	0.14	sable loameux brunrouge/ meuble/ R peu abond/ pH: 5.7
	13-26	Bf	1.75	0.13	sable brunrouge/ meuble/ R très peu abond/ pH: 5.4
	26-51	Bm1	0.51	0.05	sable jaunerouge/ meuble/ pH: 5.6
	51-66	Bm2	0.48	0.04	loam sableux fin brunjaune/ pH: 5.5
	à 66	Cgi	0.08	0.02	sable brunjaune/ meuble/ pH: 5.2
SAINT-THOMAS (Rel: 12) (sable loameux) (Dr bon à excessif)	0-19	Ap	3.42	0.21	sable loameux brunjaune foncé/ R abond/ pH: 5.0
	19-23	Ae	1.45	0.08	sable gris/ meuble/ R abond (gros) très abond (fin)/ pH: 4.6
	23-35	Bfh	4.26	0.20	sable brunrouge foncé/ meuble/ R peu abond/ concrétion/ pH: 4.9
	35-71	Bf	1.24	0.10	sable brun vil/ meuble/ R peu abond et très peu abond en partie in/ pH: 5.2
	71-78	BC	0.22	0.02	sable fin jaunerouge/ meuble/ concrétion/ pH: 5.2
	à 78	C	0.08	0.04	sable brun pale/ meuble/ pH: 5.5
TILLY (Rel: 7) (loam argileux) (Dr modérément bon)	0-14	Ap	3.62	0.32	loam argileux brun/ R peu abond/ frag schiste/ pH:6.1
	14-18	Ae	1.14	0.18	loam limonoargileux brun/R très abond/frag schiste/ pH:4.6
	18-28	Bf	1.38	0.16	loam argileux rougejaune/ R abond/ frag schiste/ pH: 4.8
	28-37	Bm	0.70	0.14	loam limoneux brun vil/ R abond/ frag schiste/ pH: 4.8
	37-60	Bmgj	0.40	0.14	loam limoneux brunjaune/ R peu abond/ frag schiste/ pH: 4.8
	60-75	Cg1	0.31	0.12	loam brun foncé/ R très peu abond/ frag schistes/ pH: 4.8
	à 75	Cg2	0.27	0.10	loam brungris/ frag schistes/ pH: 4.6
TILLY (Rel: Bélar, 8) (argile limoneuse) (Dr modérément bon)	0-3	Ae1	3.4	-	argile limoneuse brungris/ R peu abond/
	3-8	Ae2	3.4	-	argile limoneuse brunrouge/
	8-21	Bfh	5.2	-	loam limono-argileux brun/ R abond/
	21-36	Bf	2.4	-	loam limono-argileux brun/ R abond/
	36-63	Btj	1.6	-	loam limon-argileux brungris/
	63-102	Btjg1	0.5	-	loam limoneux olive/ R plus abond/ frag schiste/
	102-127	Btjg2	0.5	-	loam limoneux gris/ R peu abond/
	127-140	Ctj	0.7	-	frag schiste/
	140-165	R			frag schiste/
	165-203	Rk			schiste calcaire/ frag/ veine de calcite
UPLANDS (Rel: 32) (sable à loam sableux) (Dr excessif)	5-0	L-H	14.22	0.59	mat org à demi décomposée noire/ R abond et très abond (fine)/ pH: 4.5
	0-17	Bf	1.54	0.08	loam sableux brun/ meuble/ R abond et peu abond (fine)/ pH: 4.7
	17-46	Bm	0.31	0.04	sable loameux brunjaune/ meuble/ R peu abond/ pH: 4.8
	à 51	C	0.06	0.01	sable loameux à sable brunjaune/ meuble/ pH: 5.2
VAUDREUIL (Rel: 24) (loam à loam sableux) (Dr mauvais à très mauvais)	0-26	Ap	22.59	0.71	loam noir/ R très abond/ pH:5.0
	26-28	AC	1.97	0.06	loam sableux brun/ r très peu abond/ pH: 5.1
	28-50	Cg1	0.12	0.01	loam sableux très fin grisolive/ R très peu abond/ pH: 5.8
	à 50	Cg2	0.25	0.06	loam sableux fin olive/ R très peu abond/ pH: 6.0
FARMINGTON (Rel: 4) (terrain) (Dr variable)		Ap	3.71	0.40	loam argileux brun/ R peu abond/ gravier/ pH: 6.3
		Ck	1.90	0.26	loam limoneux graveleux brun/ R très peu abond/ gravier/ pH: 7.5

**Tableau B2 : Résultats EVARISK avec une
utilisation du sol de type agricole**



Valeur EVARISK de flux d'eau lessivée dans le cas où il y a une zone agricole (A) (végétation= patate)

combinaison	valeur			%			valeur			%			valeur			%			resul ss p	resul av p
	ss p	av p	%	ss p	av p	%	ss p	av p	%	ss p	av p	%	ss p	av p	%	ss p	av p	%		
A			100																NA	NA
A+Ri			60	0.5649	0.4038	40													NA	NA
A+Cb			60	0.5618	0.4077	40													NA	NA
A+Mo			60	0.6137	0.5881	40	0.606	0.4213	40										NA	NA
Ac	0.6084	0.5401	100	0.5745	0.4751	100													0.59145	0.5076
Ac+Mo	0.6084	0.5401	60	0.5745	0.4751	60	0.6137	0.5881	40	0.606	0.4213	40							0.59881	0.50644
Ac+Th	0.6084	0.5401	60	0.5745	0.4751	60	0.619	0.6124	40	0.6041	0.4842	40							0.59949	0.52388
Ac+TNS	0.6084	0.5401	60	0.5745	0.4751	60	0.0873	0.0376	40										0.58979	0.51961
Ag	0.6159	0.5863	100	0.6162	0.531	100													0.61605	0.55865
Ag+Mb+l	0.6159	0.5863	50	0.6162	0.531	50	0.6155	0.5452	30	0.6136	0.6147	20							0.61540	0.56583
Ag+Sg+Mt	0.6159	0.5863	50	0.6162	0.531	50	0.6157	0.581	30	0.6078	0.6042	20	0.5725	0.3017	20				0.61077	0.54422
Ag+Sg+Mt+All	0.6159	0.5863	40	0.6162	0.531	40	0.6157	0.581	30	0.6078	0.6042	20	0.5725	0.3017	20	0.4208	0.3471	10	0.59124	0.52306
All	0.6091	0.6062	100	0.0886	0.0337	100	0.5648	0.4015	100										0.42083	0.34713
All+Ce	0.4208	0.3471	60	0.5753	0.4191	40	0.5697	0.3823	40										0.48150	0.36856
All+Jy	0.4208	0.3471	60	0.0417	0.0003	40													0.26919	0.2084
All+mar	0.4208	0.3471	60	0.0873	0.0376	40													0.28741	0.22333
All+Mt	0.4208	0.3471	60	0.6078	0.6042	40	0.5725	0.3017	40										0.48856	0.38946
All+Mt+Mb	0.4208	0.3471	50	0.6078	0.6042	30	0.5725	0.3017	30	0.6155	0.5452	20							0.51056	0.41849
All+Pc	0.4208	0.3471	60	0.5615	0.3495	40													0.47710	0.34808
An	0.5875	0.5708	100																0.58750	0.5708
An+Bx+Nv	0.5875	0.5708	50	0.5978	0.5905	30	0.5803	0.5323	20										0.58915	0.56901
B	0.1387	0.0832	100																0.13870	0.08322
B+Ba	0.1387	0.0832	60	0.59	0.5505	40													0.31922	0.27013
Ba	0.59	0.5505	100																0.59000	0.5505
Ba-e	0.59	0.5505	100																0.59000	0.5505
Ba+Ce	0.59	0.5505	60	0.5753	0.4191	40	0.5697	0.3823	40										0.58300	0.49058
Ba+Pc	0.59	0.5505	60	0.5615	0.3495	40													0.57860	0.4701
Ber	0.5906	0.5786	100																0.59060	0.5786
Ber+Fa	0.5906	0.5786	60	0.5494	0.2566	40													0.57412	0.4498
Ber+Nv	0.5906	0.5786	60	0.5803	0.5323	40													0.58648	0.56008
Bev	0.5937	0.4425	100																0.59370	0.4425
Bf	0.5827	0.5773	100																0.58270	0.5773
Bf+All	0.5827	0.5773	60	0.4208	0.3471	40													0.51795	0.48523
Bf+De	0.5827	0.5773	60	0.5932	0.5546	40	0.594	0.5414	40										0.58706	0.56558
Bf+Mo+De	0.5827	0.5773	50	0.6137	0.5881	30	0.606	0.4213	30	0.5932	0.5546	20	0.594	0.5414	20				0.59303	0.54966
Bf+Pc	0.5827	0.5773	60	0.5615	0.3495	40													0.57422	0.48618
Bx	0.5978	0.5905	100																0.59780	0.5905
Bx+All	0.5978	0.5905	60	0.4208	0.3471	40													0.52701	0.49315
Bx+Nv	0.5978	0.5905	60	0.5803	0.5323	40													0.59080	0.56722
Bx+TNS	0.5978	0.5905	60	0.0873	0.0376	40													0.59360	0.56635
C	0.5736	0.5022	100																0.57360	0.5022
C+All	0.5736	0.5022	60	0.4208	0.3471	40													0.51249	0.44017
C+Nv	0.5736	0.5022	60	0.5803	0.5323	40													0.57628	0.51424
C+Nv+An	0.5736	0.5022	50	0.5803	0.5323	30	0.5875	0.5708	20										0.57839	0.52495
Cb	0.5818	0.4077	100																0.58180	0.4077
Cb+A	0.5818	0.4077	60			40													0.58180	0.4077
Cb+A+A	0.5818	0.4077	50			30													NA	NA
Cb+A+Ag	0.5818	0.4077	50			30	0.6159	0.5863	20	0.6162	0.531	20							0.59303	0.49033
Cb+A+H	0.5818	0.4077	50			30	0.6136	0.6147	20										0.57360	0.49018
Cb+Ac	0.5818	0.4077	60	0.6084	0.5401	40	0.5745	0.4751	40										0.57366	0.44766
Cb+Ag+A	0.5818	0.4077	50	0.6159	0.5863	30	0.6162	0.531	30										0.59303	0.49033
Cb+Ag+Sg	0.5818	0.4077	50	0.6159	0.5863	30	0.6162	0.531	30	0.6157	0.591	20							0.58886	0.49765
Cb+Fl	0.5818	0.4077	60	0.5957	0.4974	40													0.57636	0.44358
Cb+Mt	0.5818	0.4077	60	0.6078	0.6042	40	0.5725	0.3017	40										0.57314	0.4258
Cb+Mt+All	0.5818	0.4077	50	0.6078	0.6042	30	0.5725	0.3017	30	0.4208	0.3471	20							0.54211	0.40916
Cb+Sg	0.5818	0.4077	60	0.6157	0.581	40													0.58336	0.47702
Cb+TNS+Mt	0.5818	0.4077	50	0.0873	0.0376	30	0.6078	0.6042	20	0.5725	0.3017	20							0.42512	0.30573
Ce	0.5753	0.4191	100	0.5697	0.3823	100													0.57250	0.4007
Ce-a	0.5697	0.3823	100																0.56970	0.3823
Ce-a+R-I	0.5697	0.3823	60	0.0557	0.0007	40													0.36410	0.22968
Ce+Ac	0.5753	0.4191	60	0.5697	0.3823	60	0.6084	0.5401	40	0.5745	0.4751	40							0.58008	0.44346
Ce+Ba	0.5753	0.4191	60	0.5697	0.3823	60	0.59	0.5505	40										0.57950	0.46062
Ce+Cm	0.5753	0.4191	60	0.5697	0.3823	60	0.5715	0.4473	40										0.57210	0.41934
Ce+D	0.5753	0.4191	60	0.5697	0.3823	60	0.5549	0.3639	40										0.56546	0.38598
Ce+J	0.5753	0.4191	60	0.5697	0.3823	60	0.5848	0.5844	40	0.6053	0.4338	40							0.58152	0.44406
Ce+Lr	0.5753	0.4191	60	0.5697	0.3823	60	0.5514	0.2747	40	0.0909	0.0655	40							0.47195	0.30846
Cm	0.5715	0.4473	100																0.57150	0.4473
Cm+B	0.5715	0.4473	60	0.1387	0.0832	40													0.39838	0.30167
Cm+Ce	0.5715	0.4473	60	0.5753	0.4191	40	0.5697	0.3823	40										0.57190	0.42866
D	0.5549	0.3639	100																0.55490	0.3639
D+B	0.5549	0.3639	60	0.1387	0.0832	40													0.38842	0.25163
D+Pc	0.5549	0.3639	60	0.5615	0.3495	40													0.55754	0.35814
D+Pc+All	0.5549	0.3639	50	0.5615	0.3495	30	0.4208	0.3471	20										0.53007	0.35623
De	0.5932	0.5546	100	0.594	0.5414	100													0.59360	0.548
De+All	0.5932	0.5546	60	0.594	0.5414	60	0.4208	0.3471	40										0.52449	0.46765

De+Mo	0.5932	0.5546	60	0.594	0.5414	60	0.6137	0.5881	40	0.606	0.4213	40							0.60010	0.53068
De+Mt	0.5932	0.5546	60	0.594	0.5414	60	0.6078	0.6042	40	0.5725	0.3017	40							0.59222	0.50998
De+Mt+TN/S	0.5932	0.5546	50	0.594	0.5414	50	0.6078	0.6042	30	0.5725	0.3017	30	0.0873	0.0376	20				0.49130	0.41741
De+Mo+mar	0.5932	0.5546	50	0.594	0.5414	50	0.6137	0.5881	30	0.606	0.4213	30	0.0873	0.0376	20				0.49721	0.43293
De+Lu	0.5932	0.5546	60	0.594	0.5414	60	0.6339	0.6034	40										0.60972	0.57016
Fa	0.5494	0.2566	100																0.54940	0.2566
Fa+Ber	0.5494	0.2566	60	0.5906	0.5786	40													0.56588	0.3854
Fa+Bx+Nv	0.5494	0.2566	50	0.5978	0.5905	30	0.5803	0.5323	20										0.57010	0.41191
Fl	0.5957	0.4974	100																0.59570	0.4974
Fl+I-f	0.5957	0.4974	60	0.6136	0.6147	40													0.60286	0.54432
Gr	0.56	0.4481	100																0.56000	0.4481
I	0.6136	0.6147	100																0.61360	0.6147
I-f	0.6136	0.6147	100																0.61360	0.6147
I-f+Bev	0.6136	0.6147	60	0.5937	0.4425	40													0.60564	0.54582
I-f+Mo	0.6136	0.6147	60	0.6137	0.5881	40	0.606	0.4213	40										0.61210	0.5707
J	0.5848	0.5844	100	0.6053	0.4338	100													0.59505	0.5091
J+An	0.5848	0.5844	60	0.6053	0.4338	60	0.5875	0.5708	40										0.59203	0.53378
J+S+Sm	0.5848	0.5844	50	0.6053	0.4338	50	0.551	0.3202	30	0.5506	0.0357	20							0.57295	0.35775
J+Sm	0.5848	0.5844	60	0.6053	0.4338	60	0.5506	0.0357	40										0.57727	0.31975
J+Sm+Cm	0.5848	0.5844	50	0.6053	0.4338	50	0.5506	0.0357	30	0.5715	0.4473	20							0.57701	0.35473
J+Up	0.5848	0.5844	60	0.6053	0.4338	60	0.5795	0.5135	40										0.58883	0.51086
Jy	0.0417	0.0003	100																0.04172	0.0003
Jy-g	0.0417	0.0003	100																0.04172	0.0003
Jy+Pn	0.0417	0.0003	60	0.0729	0.0005	40													0.05419	0.00038
Jy+Ty+Pn	0.0417	0.0003	50	0.5439	0.1943	30	0.1119	0.0001	30	0.0729	0.0005	20							0.13381	0.02941
Lc	0.5651	0.4514	100																0.56510	0.4514
Lc+All	0.5651	0.4514	60	0.4208	0.3471	40													0.50739	0.40969
Lr	0.5514	0.2747	100	0.0909	0.0655	100													0.32114	0.17011
Lr-e	0.5514	0.2747	100	0.0909	0.0655	100													0.32114	0.17011
Lr-r	0.5514	0.2747	100	0.0909	0.0655	100													0.32114	0.17011
Lr+Ce	0.5514	0.2747	60	0.0909	0.0655	60	0.5753	0.4191	40	0.5697	0.3823	40							0.42168	0.26234
Lr+Cm	0.5514	0.2747	60	0.0909	0.0655	60	0.5715	0.4473	40										0.42128	0.28098
Lr+r+Jr	0.5514	0.2747	60	0.0909	0.0655	60	0.5848	0.5844	40	0.6053	0.4338	40							0.43070	0.3057
Lr+Nv	0.5514	0.2747	60	0.0909	0.0655	60	0.5803	0.5323	40										0.42480	0.31498
Lr+R	0.5514	0.2747	60	0.0909	0.0655	60	0.0557	0.0007	40										0.21497	0.10236
Lu	0.6339	0.6034	100																0.63390	0.6034
Lu+De+mar	0.6339	0.6034	50	0.5932	0.5546	30	0.594	0.5414	30	0.0873	0.0376	20							0.51249	0.47362
Lu+De+Mo	0.6339	0.6034	50	0.5932	0.5546	30	0.594	0.5414	30	0.6137	0.5881	20	0.606	0.4213	20				0.61700	0.56704
mar	0.0873	0.0376	100																0.08729	0.03762
mar+Fa	0.0873	0.0376	50	0.5494	0.2566	40													0.27213	0.12521
Mb+Mt	0.6155	0.5452	60	0.6078	0.6042	40	0.5725	0.3017	40										0.60536	0.5083
Mb+Mt+A	0.6155	0.5452	50	0.6078	0.6042	30	0.5725	0.3017	30										0.59530	0.5033
Mb+De	0.6155	0.5452	60	0.5932	0.5546	40	0.594	0.5414	40										0.60674	0.54632
Mc	0.5915	0.5732	100																0.59150	0.5732
Mc+Fa	0.5915	0.5732	60	0.5494	0.2566	40													0.57466	0.44656
Mc+Nv	0.5915	0.5732	60	0.5803	0.5323	40													0.58702	0.55684
Mo	0.6137	0.5881	100	0.606	0.4213	100													0.60985	0.5047
Mo+Ac	0.6137	0.5881	60	0.606	0.4213	60	0.6084	0.5401	40	0.5745	0.4751	40							0.60249	0.50586
Mo+All	0.6137	0.5881	50	0.606	0.4213	50	0.4208	0.3471	40										0.53424	0.44167
Mo+De	0.6137	0.5881	60	0.606	0.4213	60	0.5932	0.5546	40	0.594	0.5414	40							0.60335	0.52202
Mo+De+Lu	0.6137	0.5881	50	0.606	0.4213	50	0.5932	0.5546	30	0.594	0.5414	30	0.6339	0.6034	20				0.60979	0.53743
Mo+I-f	0.6137	0.5881	60	0.606	0.4213	60	0.6136	0.6147	40										0.61135	0.5487
Mo+Lu	0.6137	0.5881	60	0.606	0.4213	60	0.6339	0.6034	40										0.61947	0.54418
Mo+Mt	0.6137	0.5881	60	0.606	0.4213	60	0.6078	0.6042	40	0.5725	0.3017	40							0.60197	0.484
Mo+Mt+A	0.6137	0.5881	50	0.606	0.4213	50	0.6078	0.6042	30	0.5725	0.3017	30							0.60197	0.484
Mo+Mt+De	0.6137	0.5881	50	0.606	0.4213	50	0.6078	0.6042	30	0.5725	0.3017	30	0.5932	0.5546	20	0.594	0.5414	20	0.60069	0.49784
Mo+Mt+Ry+m	0.6137	0.5881	50	0.606	0.4213	50	0.6078	0.6042	30	0.5725	0.3017	30	0.5761	0.5165	20				0.59719	0.49154
Mo+P	0.6137	0.5881	60	0.606	0.4213	60	0.607	0.5391	40	0.5922	0.4894	40							0.60575	0.50852
Mo+P+Mt	0.6137	0.5881	50	0.606	0.4213	50	0.607	0.5391	30	0.5922	0.4894	30	0.6078	0.6042	20	0.5725	0.3017	20	0.60284	0.49722
Mt	0.6078	0.6042	100	0.5725	0.3017	100													0.59015	0.45295
Mt+All	0.6078	0.6042	60	0.5725	0.3017	60	0.4208	0.3471	40										0.52242	0.41062
Mt+Cb+All	0.6078	0.6042	50	0.5725	0.3017	50	0.5618	0.4077	30	0.4206	0.3471	20							0.54778	0.00431
Mt+Fl	0.6078	0.6042	60	0.5725	0.3017	60	0.5957	0.4974	40										0.59237	0.47073
Mt+Fl+Cb	0.6078	0.6042	50	0.5725	0.3017	50	0.5957	0.4974	30	0.5618	0.4077	20							0.58615	0.00539
Mt+I+Cb	0.6078	0.6042	50	0.5725	0.3017	50	0.6136	0.6147	30	0.5618	0.4077	20							0.59152	0.00605
Mt+Mb	0.6078	0.6042	60	0.5725	0.3017	60	0.6155	0.5452	40										0.60029	0.48985
Mt+Mo	0.6078	0.6042	60	0.5725	0.3017	60	0.6137	0.5881	40	0.606	0.4213	40							0.59803	0.47365
Mt+Mo+I-f	0.6078	0.6042	50	0.5725	0.3017	50	0.6137	0.5881	30	0.606	0.4213	30	0.6136	0.6147	20				0.60075	0.50083
Mt+Mo+P	0.6078	0.6042	50	0.5725	0.3017	50	0.6137	0.5881	30	0.606	0.4213	30	0.607	0.5391	20	0.5922	0.4894	20	0.59795	0.48074
Mt+Ry	0.6078	0.6042	50	0.5725	0.3017	60	0.5761	0.5165	40										0.52552	0.43308
Nv	0.5803	0.5323	100																0.58030	0.5323
Nv+C	0.5803	0.5323	60	0.5736	0.5022	40													0.57762	0.52026
Nv+Mc	0.5803	0.5323	60	0.5915	0.5732	40													0.58478	0.54866
Nv+Tb	0.5803	0.5323	60	0.5891	0.5575	40													0.58382	0.54238
Nv+TN/S	0.5803	0.5323	50	0.0873	0.0376	40													0.59310	0.53443
Nv+TN/AC	0.5803	0.5323	50	0.0873	0.0376	40													0.59310	0.53443
P	0.607	0.5391	100	0.5922	0.4894	100													0.59960	0.51425
P+Mt	0.607	0.5391	60	0.5922	0.4894	60	0.6078	0.6042	40	0.5725	0.3017	40							0.595	

Valeur EVARISK de flux d'eau lessivée dans le cas où il y a une zone agricole (A) (végétation= maïs)

combinaison	valeur			%	valeur			%	valeur			%	valeur			%	resul ss p	resul av p		
	ss p	av p			ss p	av p			ss p	av p			ss p	av p					ss p	av p
A				100												NA	NA			
A+Ri				60	0.4687	0.2856	40									NA	NA			
A+Cb				60	0.4679	0.3022	40									NA	NA			
A+Mo				60	0.5323	0.5107	40	0.5183	0.3587	40						NA	NA			
Ac	0.5201	0.4406	100	0.4979	0.3868	100										0.509	0.4137			
Ac+Mo	0.5201	0.4406	60	0.4979	0.3868	60	0.5323	0.5107	40	0.5183	0.3587	40				0.51552	0.4221			
Ac+Th	0.5201	0.4406	60	0.4979	0.3868	60	0.538	0.521	40	0.5127	0.4043	40				0.51554	0.43328			
Ac+TN/S	0.5201	0.4406	60	0.4979	0.3868	60	0.0523	0.00596	40							0.326308	0.2506			
Ag	0.5373	0.5079	100	0.5359	0.4576	100										0.5366	0.48275			
Ag+Mb+l	0.5373	0.5079	50	0.5359	0.4576	50	0.5401	0.4707	30	0.5399	0.5259	20				0.53831	0.48777			
Ag+Sg+Mt	0.5373	0.5079	50	0.5359	0.4576	50	0.5296	0.4973	30	0.5245	0.5206	20	0.5018	0.2438	20	0.52981	0.46701			
Ag+Sg+Mt+All	0.5373	0.5079	40	0.5359	0.4576	40	0.5296	0.4973	30	0.5245	0.5206	20	0.5018	0.2438	20	0.3499	0.2853	10	0.511139	0.44726
All	0.5316	0.5388	100	0.0455	0.0044	100	0.4726	0.3126	100							0.349893	0.28528			
All+Ce	0.3499	0.2853	60	0.4566	0.3066	40	0.4912	0.2987	40							0.399494	0.29223			
All+Jy	0.3499	0.2853	60	0.0232	6E-06	40										0.219214	0.17117			
All+mar	0.3499	0.2853	60	0.0523	0.006	40										0.230842	0.17355			
All+Mt	0.3499	0.2853	60	0.5245	0.5206	40	0.5018	0.2438	40							0.415194	0.32405			
All+Mt+Mb	0.3499	0.2853	50	0.5245	0.5206	30	0.5018	0.2438	30	0.5401	0.4707	20				0.43691	0.35144			
All+Pc	0.3499	0.2853	60	0.4733	0.2585	40										0.399254	0.27457			
An	0.4988	0.4867	100													0.4988	0.4867			
An+Bx+Nv	0.4988	0.4867	50	0.5278	0.5193	30	0.4859	0.4462	20							0.50492	0.48838			
B	0.1316	0.0472	100													0.1316	0.04716			
B+Ba	0.1316	0.0472	60	0.4858	0.4532	40										0.27328	0.20958			
Ba	0.4858	0.4532	100													0.4858	0.4532			
Ba-e	0.4858	0.4532	100													0.4858	0.4532			
Ba+Ce	0.4858	0.4532	60	0.4566	0.3066	40	0.4912	0.2987	40							0.48104	0.39298			
Ba+Pc	0.4858	0.4532	60	0.4733	0.2585	40										0.4808	0.37532			
Ber	0.5151	0.5099	100													0.5151	0.5099			
Ber+Fa	0.5151	0.5099	60	0.4564	0.1672	40										0.49162	0.37282			
Ber+Nv	0.5151	0.5099	60	0.4859	0.4462	40										0.50342	0.48442			
Bev	0.5242	0.3656	100													0.5242	0.3656			
Bf	0.4964	0.479	100													0.4964	0.479			
Bf+All	0.4964	0.479	60	0.3499	0.2853	40										0.437796	0.40151			
Bf+De	0.4964	0.479	60	0.5272	0.4818	40	0.5175	0.4616	40							0.50678	0.47608			
Bf+Mo+De	0.4964	0.479	50	0.5323	0.5107	30	0.5183	0.3587	30	0.5272	0.4818	20	0.5175	0.4616	20	0.51026	0.46425			
Bf+Pc	0.4964	0.479	60	0.4733	0.2585	40										0.48716	0.3908			
Bx	0.5278	0.5193	100													0.5278	0.5193			
Bx+All	0.5278	0.5193	60	0.3499	0.2853	40										0.456636	0.42569			
Bx+Nv	0.5278	0.5193	60	0.4859	0.4462	40										0.51104	0.49006			
Bx+TN/S	0.5278	0.5193	60	0.0523	0.006	40										0.337588	0.31396			
C	0.4818	0.4039	100													0.4818	0.4039			
C+All	0.4818	0.4039	60	0.3499	0.2853	40										0.429036	0.35645			
C+Nv	0.4818	0.4039	60	0.4859	0.4462	40										0.48344	0.42082			
C+Nv+An	0.4818	0.4039	50	0.4859	0.4462	30	0.4988	0.4867	20							0.48643	0.43315			
Cb	0.4679	0.3022	100													0.4679	0.3022			
Cb+A	0.4679	0.3022	60			40										0.4679	0.3022			
Cb+A+A	0.4679	0.3022	50			30			20							NA	NA			
Cb+A+Ag	0.4679	0.3022	50			30	0.5373	0.5079	20	0.5359	0.4576	20				0.491842	0.36539			
Cb+A+l	0.4679	0.3022	50			30	0.5399	0.5259	20							0.4931	0.3605			
Cb+Ac	0.4679	0.3022	60	0.5201	0.4406	40	0.4979	0.3868	40							0.46434	0.3468			
Cb+Ag+A	0.4679	0.3022	50	0.5373	0.5079	30	0.5359	0.4576	30							0.49236	0.37442			
Cb+Ag+Sg	0.4679	0.3022	50	0.5373	0.5079	30	0.5359	0.4576	30	0.5296	0.4973	20				0.50085	0.39539			
Cb+Fl	0.4679	0.3022	60	0.4899	0.3959	40										0.4767	0.33968			
Cb+Mt	0.4679	0.3022	60	0.5245	0.5206	40	0.5018	0.2438	40							0.486	0.3342			
Cb+Mt+All	0.4679	0.3022	50	0.5245	0.5206	30	0.5018	0.2438	30	0.3499	0.2653	20				0.457873	0.32282			
Cb+Sg	0.4679	0.3022	60	0.5296	0.4973	40										0.49258	0.38024			
Cb+TN/S+Mt	0.4679	0.3022	50	0.0523	0.006	30	0.5245	0.5206	20	0.5018	0.2438	20				0.352261	0.22933			
Ce	0.4566	0.3066	100	0.4912	0.2987	100										0.4739	0.30265			
Ce-a	0.4912	0.2987	100													0.4912	0.2987			
Ce-a+R+l	0.4912	0.2987	60	0.0179	8E-07	40										0.30186	0.17922			
Ce+Ac	0.4566	0.3066	60	0.4912	0.2987	60	0.5201	0.4406	40	0.4979	0.3868	40				0.48794	0.34707			
Ce+Ba	0.4566	0.3066	60	0.4912	0.2987	60	0.4858	0.4532	40							0.47866	0.36287			
Ce+cm	0.4566	0.3066	60	0.4912	0.2987	60	0.4713	0.3517	40							0.47286	0.32227			
Ce+D	0.4566	0.3066	60	0.4912	0.2987	60	0.4613	0.2845	40							0.46886	0.29539			
Ce+J	0.4566	0.3066	60	0.4912	0.2987	60	0.5185	0.5092	40	0.524	0.3611	40				0.49284	0.35565			
Ce+Lr	0.4566	0.3066	60	0.4912	0.2987	60	0.4461	0.1563	40	0.0728	0.0434	40				0.388128	0.22153			
Cm	0.4713	0.3517	100													0.4713	0.3517			
Cm+B	0.4713	0.3517	60	0.1316	0.0472	40										0.33542	0.22988			
Cm+Ce	0.4713	0.3517	60	0.4566	0.3066	40	0.4912	0.2987	40							0.47234	0.33208			
D	0.4613	0.2845	100													0.4613	0.2845			
D+B	0.4613	0.2845	60	0.1316	0.0472	40										0.32942	0.18956			
D+Pc	0.4613	0.2845	60	0.4733	0.2585	40										0.4661	0.2741			
D+Pc+All	0.4613	0.2845	50	0.4733	0.2585	30	0.3499	0.28528	20							0.442618	0.27686			
De	0.5272	0.4818	100	0.5175	0.4616	100										0.52235	0.4717			
De+All	0.5272	0.4818	60	0.5175	0.4616	60	0.3499	0.28528	40							0.453366	0.39713			

**Tableau B3 : Résultats EVARISK avec une
utilisation du sol de type forestière**



Valeur EVARISK de flux d'eau lessivée dans le cas où il y a une zone forestière

combinaison	valeur			valeur			valeur			valeur			valeur			resul ss	resul av			
	ss p	av p	%	ss p	av p	%	ss p	av p	%	ss p	av p	%	ss p	av p	%					
A			100													NA	NA			
A+Ri			60	0.4588	0.2657	40										NA	NA			
A+Cb			60	0.4624	0.2969	40										NA	NA			
A+Mo			60	0.4867	0.4685	40	0.4803	0.3127	40							NA	NA			
Ac	0.4873	0.4085	100	0.4656	0.3594	100										0.4765	0.384			
Ac+Mo	0.4873	0.4085	60	0.4656	0.3594	60	0.4867	0.4685	40	0.4803	0.3127	40				0.4793	0.3866			
Ac+Th	0.4873	0.4085	60	0.4656	0.3594	60	0.4945	0.4761	40	0.4922	0.3683	40				0.4832	0.3993			
Ac+TNS	0.4873	0.4085	60	0.4656	0.3584	60	0.0038	0	40							0.2874	0.2304			
Ag	0.5066	0.4762	100	0.5142	0.4269	100										0.5104	0.4516			
Ag+Mb+l	0.5066	0.4762	50	0.5142	0.4269	50	0.4906	0.4252	30	0.491	0.4884	20				0.5006	0.451			
Ag+Sg+Mt	0.5066	0.4762	50	0.5142	0.4269	50	0.4626	0.4492	30	0.4916	0.4923	20	0.472	0.1974	20	0.4903	0.4295			
Ag+Sg+Mt+All	0.5066	0.4762	40	0.5142	0.4269	40	0.4626	0.4492	30	0.4916	0.4923	20	0.472	0.1974	20	0.31992	0.2556	10	0.4713	0.4099
All	0.5004	0.4925	100	0.005	5E-06	100	0.4544	0.2744	100								0.3199	0.2556		
All+Ce	0.3199	0.2556	60	0.4619	0.2871	40	0.482	0.2852	40								0.3807	0.2678		
All+Jy	0.3199	0.2556	60	0.0121	0	40											0.1968	0.1534		
All+mar	0.3199	0.2556	60	0.0038	0	40											0.1933	0.1534		
All+Mt	0.3199	0.2556	60	0.4916	0.4923	40	0.472	0.1974	40								0.3847	0.2913		
All+Mt+Mb	0.3199	0.2556	50	0.4916	0.4923	30	0.472	0.1974	30	0.4906	0.4252	20					0.4026	0.3163		
All+Pc	0.3199	0.2556	60	0.4534	0.2315	40												0.3733	0.246	
An	0.4747	0.456	100															0.4747	0.456	
An+Bx+Nv	0.4747	0.456	50	0.482	0.4809	30	0.4617	0.4138	20									0.4743	0.455	
B	0.046	0.0061	100															0.046	0.0061	
B+Ba	0.046	0.0061	60	0.4602	0.4285	40												0.2117	0.1751	
Ba	0.4602	0.4285	100															0.4602	0.4285	
Ba-e	0.4602	0.4285	100															0.4602	0.4285	
Ba+Ce	0.4602	0.4285	60	0.4619	0.2871	40	0.482	0.2852	40									0.4649	0.3716	
Ba+Pc	0.4602	0.4285	60	0.4534	0.2315	40												0.4575	0.3497	
Ber	0.471	0.4637	100															0.471	0.4637	
Ber+Fa	0.471	0.4637	60	0.4602	0.1099	40												0.4667	0.3222	
Ber+Nv	0.471	0.4637	60	0.4617	0.4138	40												0.4673	0.4437	
Bev	0.4783	0.3319	100															0.4783	0.3319	
Bf	0.4743	0.4612	100															0.4743	0.4612	
Bf+All	0.4743	0.4612	60	0.3199	0.2556	40												0.4125	0.379	
Bf+De	0.4743	0.4612	60	0.4857	0.4389	40	0.4769	0.42	40									0.4771	0.4485	
Bf+Mo+De	0.4743	0.4612	50	0.4867	0.4685	30	0.4803	0.3127	30	0.4857	0.4389	20	0.4769	0.42	20			0.4785	0.4337	
Bf+Pc	0.4743	0.4612	60	0.4534	0.2315	40												0.4659	0.3693	
Bx	0.482	0.4809	100															0.482	0.4809	
Bx+All	0.482	0.4809	60	0.3199	0.2556	40												0.4172	0.3908	
Bx+Nv	0.482	0.4809	60	0.4617	0.4138	40												0.4739	0.4541	
Bx+TNS	0.482	0.4809	60	0.0038	0	40												0.2907	0.2865	
C	0.4634	0.3734	100															0.4634	0.3734	
C+All	0.4634	0.3734	60	0.3199	0.2556	40												0.406	0.3263	
C+Nv	0.4634	0.3734	60	0.4617	0.4138	40												0.4627	0.3896	
C+Nv+An	0.4634	0.3734	50	0.4617	0.4138	30	0.4747	0.456	20									0.4652	0.402	
Cb	0.4824	0.2969	100															0.4624	0.2969	
Cb+A	0.4824	0.2969	60			40												0.4624	0.2969	
Cb+A+A	0.4824	0.2969	50			30												NA	NA	
Cb+A+Ag	0.4824	0.2969	50			30	0.5066	0.4762	20	0.5142	0.4269	20						0.4792	0.363	
Cb+A+l	0.4824	0.2969	50			30	0.491	0.4884	20									0.4724	0.3839	
Cb+Ac	0.4824	0.2969	60	0.4873	0.4085	40	0.4656	0.3594	40									0.468	0.3317	
Cb+Ag+A	0.4824	0.2969	50	0.5066	0.4762	30	0.5142	0.4269	30									0.4816	0.3588	
Cb+Ag+Sg	0.4824	0.2969	50	0.5066	0.4762	30	0.5142	0.4269	30	0.4626	0.4492	20						0.4768	0.3738	
Cb+Ri	0.4824	0.2969	60	0.4724	0.3766	40												0.4664	0.3289	
Cb+Mt	0.4824	0.2969	60	0.4916	0.4923	40	0.472	0.1974	40									0.4702	0.3161	
Cb+Mt+All	0.4824	0.2969	50	0.4916	0.4923	30	0.472	0.1974	30	0.3199	0.2556	20						0.4397	0.303	
Cb+Sg	0.4824	0.2969	60	0.4626	0.4492	40												0.4625	0.3578	
Cb+TNS+Mt	0.4824	0.2969	50	0.0038	0	30	0.4916	0.4923	20	0.472	0.1974	20						0.3287	0.2174	
Ce	0.4619	0.2871	100	0.482	0.2852	100												0.472	0.2862	
Ce-a	0.482	0.2852	100															0.482	0.2852	
Ce-a+R-l	0.482	0.2852	60	0.0014	0	40												0.2897	0.1711	
Ce+Ac	0.4619	0.2871	60	0.482	0.2852	60	0.4873	0.4085	40	0.4656	0.3594	40						0.4738	0.3253	
Ce+Ba	0.4619	0.2871	60	0.482	0.2852	60	0.4602	0.4285	40									0.4673	0.3431	
Ce+Cm	0.4619	0.2871	60	0.482	0.2852	60	0.462	0.3219	40									0.468	0.3005	
Ce+D	0.4619	0.2871	60	0.482	0.2852	60	0.4542	0.2494	40									0.4649	0.2715	
Ce+J	0.4619	0.2871	60	0.482	0.2852	60	0.4775	0.4689	40	0.5	0.3258	40						0.4787	0.3306	
Ce+Lr	0.4619	0.2871	60	0.482	0.2852	60	0.4391	0.1135	40	0.0198	0.0037	40						0.3749	0.1951	
Cm	0.462	0.3219	100															0.462	0.3219	
Cm+B	0.462	0.3219	60	0.046	0.0061	40												0.2956	0.1956	
Cm+Ce	0.462	0.329	60	0.4619	0.2871	40	0.482	0.2852	40									0.466	0.3119	
D	0.4542	0.2494	100															0.4542	0.2494	
D+B	0.4542	0.2494	60	0.046	0.0061	40												0.2909	0.1521	
D+Pc	0.4542	0.2494	60	0.4534	0.2315	40												0.4539	0.2422	
D+Pc+All	0.4542	0.2494	50	0.4534	0.2315	30	0.3199	0.2556	20									0.4271	0.2453	
De	0.4857	0.4389	100	0.4769	0.42	100												0.4813	0.4295	
De+All	0.4857	0.4389	60	0.4769	0.42	60	0.3199	0.2556	40									0.4167	0.3599	



**Tableau B4 : Résultats EVARISK avec une
utilisation du sol de type urbaine**



Valeur EVARISK de flux d'eau lessivée dans le cas où il y a une zone résidentielle (RU) (végétation= pelouse)

combinaison	valeur		%	valeur		%	valeur		%	valeur		%	valeur		%	resul ss p	resul av p			
	ss p	av p		ss p	av p		ss p	av p		ss p	av p		ss p	av p						
A			100												NA	NA				
A+Ri			60	0.6356	0.4579	40									NA	NA				
A+Cb			60	0.6308	0.4629	40									NA	NA				
A+Mo			60	0.6566	0.6337	40	0.6378	0.4681	40						NA	NA				
Ac	0.6449	0.5684	100	0.6331	0.5347	100									0.639	0.5516				
Ac+Mo	0.6449	0.5684	60	0.6331	0.5347	60	0.6566	0.6337	40	0.6378	0.4681	40			0.64228	0.5513				
Ac+Th	0.6449	0.5684	60	0.6331	0.5347	60	0.6622	0.6493	40	0.6477	0.5286	40			0.64538	0.5665				
Ac+TN/S	0.6449	0.5684	60	0.6331	0.5347	60	0.6914	0.6992	40						0.41996	0.3466				
Ag	0.6685	0.6421	100	0.6543	0.5627	100									0.6614	0.6024				
Ag+Mb+l	0.6685	0.6421	50	0.6543	0.5627	50	0.6672	0.5871	30	0.6624	0.6593	20			0.66334	0.6092				
Ag+Sg+Mt	0.6685	0.6421	50	0.6543	0.5627	50	0.6667	0.6189	30	0.6503	0.6468	20	0.6369	0.351	20	0.65943	0.5867			
Ag+Sg+Mt+All	0.6685	0.6421	40	0.6543	0.5627	40	0.6667	0.6189	30	0.6503	0.6468	20	0.6369	0.351	20	0.4571	0.3906	10	0.639	0.5655
All	0.6526	0.659	100	0.0873	0.0432	100	0.6315	0.4695	100						0.45712	0.3906				
All+Ce	0.4571	0.3906	60	0.6404	0.4792	40	0.6452	0.4367	40						0.53139	0.4175				
All+Jy	0.4571	0.3906	60	0.0783	0.0048	40									0.3056	0.2363				
All+mar	0.4571	0.3906	60	0.0914	0.0392	40									0.31084	0.25				
All+Mt	0.4571	0.3906	60	0.6503	0.6468	40	0.6369	0.351	40						0.53171	0.4339				
All+Mt+Mb	0.4571	0.3906	50	0.6503	0.6468	30	0.6369	0.351	30	0.6672	0.5871	20			0.55508	0.4624				
All+Pc	0.4571	0.3906	60	0.6382	0.412	40									0.52955	0.3991				
An	0.6406	0.6249	100												0.6406	0.6249				
An+Bx+Nv	0.6406	0.6249	50	0.6379	0.6449	30	0.6322	0.5987	20						0.63811	0.6257				
B	0.145	0.1029	100												0.145	0.1029				
B+Ba	0.145	0.1029	60	0.6419	0.6109	40									0.34376	0.3061				
Ba	0.6419	0.6109	100												0.6419	0.6109				
Ba-e	0.6419	0.6109	100												0.6419	0.6109				
Ba+Ce	0.6419	0.6109	60	0.6404	0.4792	40	0.6452	0.4367	40						0.64226	0.5497				
Ba+Pc	0.6419	0.6109	60	0.6382	0.412	40									0.64042	0.5313				
Ber	0.6377	0.6307	100												0.6377	0.6307				
Ber+Fa	0.6377	0.6307	60	0.6267	0.2897	40									0.6333	0.4943				
Ber+Nv	0.6377	0.6307	60	0.6322	0.5987	40									0.6355	0.6179				
Bev	0.6436	0.4961	100												0.6436	0.4961				
Bf	0.6466	0.6342	100												0.6466	0.6342				
Bf+All	0.6466	0.6342	60	0.4571	0.3906	40									0.57081	0.5367				
Bf+De	0.6466	0.6342	60	0.6386	0.5986	40	0.6377	0.5889	40						0.64322	0.618				
Bf+Mo+De	0.6466	0.6342	50	0.6566	0.6337	30	0.6378	0.4681	30	0.6386	0.5986	20	0.6377	0.5889	20	0.64509	0.6011			
Bf+Pc	0.6466	0.6342	60	0.6382	0.412	40									0.64324	0.5453				
Bx	0.6379	0.6449	100												0.6379	0.6449				
Bx+All	0.6379	0.6449	60	0.4571	0.3906	40									0.56559	0.5432				
Bx+Nv	0.6379	0.6449	60	0.6322	0.5987	40									0.63562	0.6264				
Bx+TN/S	0.6379	0.6449	60	0.0914	0.0392	40									0.4199	0.4026				
C	0.6423	0.5545	100												0.6423	0.5545				
C+All	0.6423	0.5545	60	0.4571	0.3906	40									0.56823	0.4889				
C+Nv	0.6423	0.5545	60	0.6322	0.5987	40									0.63826	0.5722				
C+Nv+An	0.6423	0.5545	50	0.6322	0.5987	30	0.6406	0.6249	20						0.63893	0.5818				
Cb	0.6308	0.4629	100												0.6308	0.4629				
Cb+A	0.6308	0.4629	60			40									0.6308	0.4629				
Cb+A+A	0.6308	0.4629	50			30			20						NA	NA				
Cb+A+Ag	0.6308	0.4629	50			30	0.6685	0.6421	20	0.6543	0.5627	20			0.64191	0.6117				
Cb+A+l	0.6308	0.4629	50			30	0.6624	0.6593	20						0.64198	0.6318				
Cb+Ac	0.6308	0.4629	60	0.6449	0.5684	40	0.6331	0.5347	40						0.63408	0.4984				
Cb+Ag+A	0.6308	0.4629	50	0.6685	0.6421	30	0.6543	0.5627	30						0.64304	0.5167				
Cb+Ag+Sg	0.6308	0.4629	50	0.6685	0.6421	30	0.6543	0.5627	30	0.6667	0.6189	20			0.64716	0.536				
Cb+Fl	0.6308	0.4629	60	0.6455	0.5545	40									0.63668	0.4995				
Cb+Mt	0.6308	0.4629	60	0.6503	0.6468	40	0.6369	0.351	40						0.63592	0.4773				
Cb+Mt+All	0.6308	0.4629	50	0.6503	0.6468	30	0.6369	0.351	30	0.4571	0.3906	20			0.5999	0.4582				
Cb+Sg	0.6308	0.4629	50	0.6667	0.6189	40									0.64516	0.5253				
Cb+TN/S+Mt	0.6308	0.4629	50	0.0914	0.0392	30	0.6503	0.6468	20	0.6369	0.351	20			0.47154	0.343				
Ce	0.6404	0.4792	100	0.6452	0.4367	100									0.6428	0.458				
Ce-a	0.6452	0.4367	100												0.6452	0.4367				
Ce-a+RH	0.6452	0.4367	60	0.7294	0.017	40									0.67888	0.2688				
Ce+Ac	0.6404	0.4792	60	0.6452	0.4367	60	0.6449	0.5684	40	0.6331	0.5347	40			0.64128	0.4954				
Ce+Ba	0.6404	0.4792	60	0.6452	0.4367	60	0.6419	0.6109	40						0.64244	0.5191				
Ce+Cm	0.6404	0.4792	60	0.6452	0.4367	60	0.6406	0.5003	40						0.64192	0.4749				
Ce+D	0.6404	0.4792	60	0.6452	0.4367	60	0.6252	0.4479	40						0.63676	0.4539				
Ce+J	0.6404	0.4792	60	0.6452	0.4367	60	0.6423	0.6297	40	0.6481	0.4668	40			0.64376	0.4941				
Ce+Lr	0.6404	0.4792	60	0.6452	0.4367	60	0.6317	0.3182	40	0.0807	0.079	40			0.52816	0.3542				
Cm	0.6406	0.5003	100												0.6406	0.5003				
Cm+B	0.6406	0.5003	60	0.145	0.1029	40									0.44236	0.3413				
Cm+Ce	0.6406	0.5003	60	0.6404	0.4792	40	0.6452	0.4367	40						0.64148	0.4834				
D	0.6252	0.4479	100												0.6252	0.4479				
D+B	0.6252	0.4479	60	0.145	0.1029	40									0.43312	0.3099				
D+Pc	0.6252	0.4479	60	0.6382	0.412	40									0.6304	0.4335				
D+Pc+All	0.6252	0.4479	50	0.6382	0.412	30	0.4571	0.3906	20						0.59548	0.4257				
De	0.6386	0.5986	100	0.6377	0.5889	100									0.63815	0.5938				
De+All	0.6386	0.5986	60	0.6377	0.5889	60	0.4571	0.3906	40						0.56574	0.5125				

De+Mo	0.6386	0.5986	60	0.6377	0.5889	60	0.6566	0.6337	40	0.6378	0.4681	40						0.64177	0.5766	
De+Mt	0.6386	0.5986	60	0.6377	0.5889	60	0.6503	0.6468	40	0.6369	0.351	40						0.64033	0.5558	
De+Mt+TNS	0.6386	0.5986	50	0.6377	0.5889	50	0.6503	0.6468	30	0.6369	0.351	30	0.0914	0.0592	20			0.53044	0.4544	
De+Mo+mar	0.6386	0.5986	50	0.6377	0.5889	50	0.6566	0.6337	30	0.6378	0.4681	30	0.0914	0.0592	20			0.53152	0.47	
De+Lu	0.6386	0.5986	60	0.6377	0.5889	60	0.6686	0.6517	40									0.65033	0.6169	
Fa	0.6267	0.2897	100															0.6267	0.2897	
Fa+Ber	0.6267	0.2897	60	0.6377	0.6307	40												0.6311	0.4261	
Fa+Bx+Nv	0.6267	0.2897	50	0.6379	0.6449	30	0.6322	0.5987	20									0.63116	0.4581	
Fl	0.6455	0.5545	100															0.6455	0.5545	
Fl+H	0.6455	0.5545	60	0.6624	0.6593	40												0.65226	0.5964	
Gr	0.6407	0.5014	100															0.6407	0.5014	
I	0.6624	0.6593	100															0.6624	0.6593	
I-f	0.6624	0.6593	100															0.6624	0.6593	
I+Bev	0.6624	0.6593	60	0.6436	0.4961	40												0.65488	0.594	
I+Mo	0.6624	0.6593	60	0.6566	0.6337	40	0.6378	0.4681	40									0.65632	0.6159	
J	0.6423	0.6297	100	0.6481	0.4668	100												0.6452	0.5483	
J+An	0.6423	0.6297	60	0.6481	0.4668	60	0.6406	0.6249	40									0.64336	0.5789	
J+S+Sm	0.6423	0.6297	50	0.6481	0.4668	50	0.6378	0.3684	30	0.6102	0.0512	20						0.63598	0.3949	
J+Sm	0.6423	0.6297	60	0.6481	0.4668	60	0.6102	0.0512	40									0.6312	0.3494	
J+Sm+Cm	0.6423	0.6297	50	0.6481	0.4668	50	0.6102	0.0512	30	0.6406	0.5003	20						0.63378	0.3895	
J+Up	0.6423	0.6297	60	0.6481	0.4668	60	0.6449	0.5736	40									0.64508	0.5584	
Jy	0.0783	0.0048	100															0.07831	0.0048	
Jy-g	0.0783	0.0048	100															0.07831	0.0048	
Jy+Pn	0.0783	0.0048	60	0.0991	0.002	40												0.08663	0.0037	
Jy+Ty+Pn	0.0783	0.0048	50	0.6222	0.2385	30	0.1166	0.0017	30	0.0991	0.002	20						0.1698	0.0388	
Lc	0.6337	0.5292	100															0.6337	0.5292	
Lc+All	0.6337	0.5292	60	0.4571	0.3906	40												0.56307	0.4737	
Lr	0.6317	0.3182	100	0.0807	0.079	100												0.35619	0.1986	
Lr-e	0.6317	0.3182	100	0.0807	0.079	100												0.35619	0.1986	
Lr-r	0.6317	0.3182	100	0.0807	0.079	100												0.35619	0.1986	
Lr+Ce	0.6317	0.3182	60	0.0807	0.079	60	0.6404	0.4792	40	0.6452	0.4367	40						0.47083	0.3023	
Lr+Cm	0.6317	0.3182	60	0.0807	0.079	60	0.6406	0.5003	40									0.46995	0.3193	
Lr+Jr	0.6317	0.3182	60	0.0807	0.079	60	0.6423	0.6297	40	0.6481	0.4668	40						0.47179	0.3385	
Lr+Nv	0.6317	0.3182	60	0.0807	0.079	60	0.6322	0.5987	40									0.46659	0.3586	
Lr+R	0.6317	0.3182	60	0.0807	0.079	60	0.7294	0.017	40									0.50547	0.1259	
Lu	0.6686	0.6517	100															0.6686	0.6517	
Lu+De+mar	0.6686	0.6517	50	0.6386	0.5986	30	0.6377	0.5889	30	0.0914	0.0392	20						0.57403	0.5118	
Lu+De+Mo	0.6686	0.6517	50	0.6386	0.5986	30	0.6377	0.5889	30	0.6566	0.6337	20	0.6378	0.4681	20			0.65519	0.6142	
mar	0.0914	0.0392	100															0.0914	0.0392	
mar+Fa	0.0914	0.0392	60	0.6267	0.2897	40												0.30593	0.1364	
Mb+Mt	0.6672	0.5871	60	0.6503	0.6468	40	0.6369	0.351	40									0.65776	0.5518	
Mb+Mt+A	0.6672	0.5871	50	0.6503	0.6468	30	0.6369	0.351	30			20						0.65776	0.5518	
Mb+De	0.6672	0.5871	60	0.6386	0.5986	40	0.6377	0.5889	40									0.65558	0.5899	
Mc	0.6448	0.6212	100															0.6448	0.6212	
Mc+Fa	0.6448	0.6212	60	0.6267	0.2897	40												0.63756	0.4886	
Mc+Nv	0.6448	0.6212	60	0.6322	0.5987	40												0.63976	0.6122	
Mo	0.6566	0.6337	100	0.6378	0.4681	100												0.6472	0.5509	
Mo+Ac	0.6566	0.6337	60	0.6378	0.4681	60	0.6449	0.5684	40	0.6331	0.5347	40						0.64392	0.5512	
Mo+All	0.6566	0.6337	60	0.6378	0.4681	60	0.4571	0.3906	40									0.57117	0.4868	
Mo+De	0.6566	0.6337	60	0.6378	0.4681	60	0.6386	0.5986	40	0.6377	0.5889	40						0.64358	0.568	
Mo+De+Lu	0.6566	0.6337	50	0.6378	0.4681	50	0.6386	0.5986	30	0.6377	0.5889	30	0.6686	0.6517	20			0.64877	0.5839	
Mo+H	0.6566	0.6337	60	0.6378	0.4681	60	0.6624	0.6593	40									0.65328	0.5943	
Mo+Lu	0.6566	0.6337	60	0.6378	0.4681	60	0.6686	0.6517	40									0.65576	0.5912	
Mo+Mt	0.6566	0.6337	60	0.6378	0.4681	60	0.6503	0.6468	40	0.6369	0.351	40						0.64576	0.5301	
Mo+Mt+A	0.6566	0.6337	50	0.6378	0.4681	50	0.6503	0.6468	30	0.6369	0.351	30			20			0.64576	0.5301	
Mo+Mt+De	0.6566	0.6337	50	0.6378	0.4681	50	0.6503	0.6468	30	0.6369	0.351	30	0.6386	0.5986	20	0.6377	0.5889	20	0.64431	0.5439
Mo+Mt+Py-m	0.6566	0.6337	50	0.6378	0.4681	50	0.6503	0.6468	30	0.6369	0.351	30	0.643	0.5674	20			0.64528	0.5386	
Mo+P	0.6566	0.6337	60	0.6378	0.4681	60	0.6458	0.5723	40	0.643	0.5333	40						0.64608	0.5517	
Mo+P+Mt	0.6566	0.6337	50	0.6378	0.4681	50	0.6458	0.5723	30	0.643	0.5333	30	0.6503	0.6468	20	0.6369	0.351	20	0.64564	0.5411
Mt	0.6503	0.6468	100	0.6369	0.351	100												0.6436	0.4989	
Mt+All	0.6503	0.6468	60	0.6369	0.351	60	0.4571	0.3906	40									0.56901	0.4566	
Mt+Cb+All	0.6503	0.6468	50	0.6369	0.351	50	0.6308	0.4629	30	0.4571	0.3906	20						0.60246	0.0053	
Mt+Fl	0.6503	0.6468	60	0.6369	0.351	60	0.6455	0.5545	40									0.64436	0.5211	
Mt+Fl+Cb	0.6503	0.6468	50	0.6369	0.351	50	0.6455	0.5545	30	0.6308	0.4629	20						0.64161	0.0067	
Mt+H	0.6503	0.6468	50	0.6369	0.351	50	0.6624	0.6593	30	0.6308	0.4629	20						0.64668	0.0073	
Mt+Mb	0.6503	0.6468	60	0.6369	0.351	60	0.6672	0.5871	40									0.65304	0.5342	
Mt+Mo	0.6503	0.6468	60	0.6369	0.351	60	0.6566	0.6337	40	0.6378	0.4681	40						0.64504	0.5197	
Mt+Mo+H	0.6503	0.6468	50	0.6369	0.351	50	0.6566	0.6337	30	0.6378	0.4681	30	0.6624	0.6593	20			0.64844	0.5466	
Mt+Mo+P	0.6503	0.6468	50	0.6369	0.351	50	0.6566	0.6337	30	0.6378	0.4681	30	0.6458	0.5723	20	0.643	0.5333	20	0.64484	0.5263
Mt+Py	0.6503	0.6468	60	0.6369	0.351	60	0.643	0.5674	40									0.64336	0.5263	
Nv	0.6322	0.5987	100															0.6322	0.5987	
Nv+C	0.6322	0.5987	60	0.6423	0.5545	40												0.63624	0.581	
Nv+Mc	0.6322	0.5987	60	0.6448	0.6212	40												0.63724	0.6077	
Nv+Tb	0.6322	0.5987	60	0.6303	0.6397	40												0.63144	0.6151	
Nv+TNS	0.6322	0.5987	60	0.0914	0.0392	40												0.41588	0.3749	
Nv+TN/Ac	0.6322	0.5987	60	0.0914	0.0392	40												0.41588	0.3749	
P	0.6458	0.5723	100	0.643	0.5333	100												0.6444	0.5528	
P+Mt	0.6458	0.5723	60	0.643	0.5333	60	0.6503	0.6468	40	0.6369	0.351	40						0.64408	0.5312	

Tableau B5 : Synthèse des résultats

combinaison	sans végétation		U (pelouse)		F (forêt)		A(mais)		A(patate)		A(moyenne agricole)	
	resul ss p	resul av p	resul ss p	resul av p	resul ss p	resul av p	resul ss p	resul av p	resul ss p	resul av p	resul ss p	resul av p
A	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
A+Ri	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
A+Cb	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
A+Mo	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ac	0.64415	0.5547	0.639	0.55155	0.47645	0.38395	0.509	0.4137	0.59145	0.5076	0.550225	0.46065
Ac+Mo	0.64967	0.55754	0.64228	0.55129	0.47927	0.38661	0.51552	0.4221	0.59881	0.50644	0.557165	0.46427
Ac+Th	0.64923	0.57104	0.6454	0.56651	0.48321	0.39925	0.51554	0.43328	0.59949	0.52388	0.557515	0.47858
Ac+TN/S	0.420846	0.350024	0.419964	0.346626	0.2873724	0.23037	0.326308	0.2506036	0.389786	0.319608	0.368047	0.2861056
Ag	0.6703	0.61855	0.6614	0.6024	0.5104	0.45155	0.5366	0.48275	0.61605	0.55865	0.576325	0.5207
Ag+Mb+l	0.67397	0.623935	0.66334	0.60919	0.50058	0.451015	0.53831	0.487765	0.615395	0.565825	0.5768525	0.526795
Ag+Sg+Mt	0.66429	0.60475	0.65943	0.58665	0.49034	0.429505	0.52981	0.467005	0.610765	0.544215	0.5702875	0.50561
Ag+Sg+Mt+All	0.64304	0.577101	0.639002	0.565467	0.471292	0.409913	0.511139	0.447258	0.591243	0.523063	0.551191	0.4851605
All	0.4578033	0.38481	0.45712	0.3905733	0.3199197	0.25563499	0.34989333	0.28528033	0.42083333	0.34713333	0.38536333	0.31620683
All+Ce	0.529	0.411266	0.531392	0.417522	0.380732	0.267838	0.399494	0.292228	0.481498	0.368558	0.440496	0.330393
All+Jy	0.30624	0.2332364	0.305596	0.2362708	0.196772	0.153378	0.219214	0.17117032	0.269186	0.20839644	0.2442	0.18978338
All+mar	0.305036	0.24809	0.310836	0.250038	0.1934544	0.153378	0.230842	0.1735516	0.287414	0.223326	0.259128	0.1984388
All+Mt	0.53132	0.431686	0.531712	0.433902	0.384672	0.291318	0.415194	0.324048	0.488558	0.389458	0.451876	0.356753
All+Mt+Mb	0.55674	0.463485	0.55508	0.462375	0.40262	0.31631	0.43691	0.35144	0.51056	0.41849	0.473735	0.384965
All+Pc	0.52516	0.392206	0.529552	0.399142	0.373312	0.245978	0.399254	0.274568	0.477098	0.348078	0.438176	0.311323
An	0.6377	0.6292	0.6406	0.6249	0.4747	0.456	0.4988	0.4867	0.5875	0.5708	0.54315	0.52875
An+Bx+Nv	0.64099	0.62811	0.63811	0.62566	0.47429	0.45503	0.50492	0.48838	0.58915	0.56901	0.547035	0.528695
B	0.1304	0.09381	0.145	0.1029	0.04602	0.006147	0.1316	0.04716	0.1387	0.08322	0.13515	0.06519
B+Ba	0.33532	0.297366	0.34376	0.3061	0.211692	0.1750882	0.27328	0.209576	0.31922	0.270132	0.29625	0.239854
Ba	0.6427	0.6027	0.6419	0.6109	0.4602	0.4285	0.4858	0.4532	0.59	0.5505	0.5379	0.50185
Ba-e	0.6427	0.6027	0.6419	0.6109	0.4602	0.4285	0.4858	0.4532	0.59	0.5505	0.5379	0.50185
Ba+Ce	0.63994	0.542	0.64226	0.54972	0.4649	0.37156	0.48104	0.39298	0.583	0.49058	0.53202	0.44178
Ba+Pc	0.6361	0.52294	0.64042	0.53134	0.45748	0.3497	0.4808	0.37532	0.5786	0.4701	0.5297	0.42271
Ber	0.638	0.6312	0.6377	0.6307	0.471	0.4637	0.5151	0.5099	0.5906	0.5786	0.55285	0.54425
Ber+Fa	0.63684	0.49724	0.6333	0.4943	0.46668	0.32218	0.49162	0.37282	0.57412	0.4498	0.53287	0.41131
Ber+Nv	0.63984	0.61508	0.6355	0.6179	0.46728	0.44374	0.50342	0.48442	0.58648	0.56008	0.54495	0.52225
Bev	0.6382	0.4982	0.6436	0.4961	0.4783	0.3319	0.5242	0.3656	0.5937	0.4425	0.55895	0.40405
Bf	0.638	0.6322	0.6466	0.6342	0.4743	0.4612	0.4964	0.479	0.5827	0.5773	0.53955	0.52815
Bf+All	0.56592	0.533244	0.570808	0.536748	0.412548	0.378972	0.437796	0.401512	0.617952	0.485232	0.477874	0.443372
Bf+De	0.63858	0.61698	0.64322	0.61802	0.4771	0.4485	0.50678	0.47608	0.58706	0.56558	0.54692	0.52083
Bf+Mo+De	0.644425	0.60347	0.64509	0.60112	0.47846	0.43367	0.51026	0.46425	0.593025	0.54966	0.5516425	0.506955
Bf+Pc	0.63328	0.54064	0.64324	0.54532	0.46594	0.36932	0.48716	0.3908	0.57422	0.48618	0.53069	0.43849
Bx	0.6454	0.6511	0.6379	0.6449	0.482	0.4809	0.5278	0.5193	0.5978	0.5905	0.5628	0.5549
Bx+Al	0.57036	0.544584	0.565588	0.543168	0.417168	0.390792	0.456636	0.425692	0.527012	0.493152	0.491824	0.458422
Bx+Nv	0.64428	0.62702	0.63562	0.62642	0.47388	0.45406	0.51104	0.49006	0.5908	0.56722	0.55092	0.52864
Bx+TN/S	0.421566	0.407964	0.419304	0.402636	0.2907024	0.26654	0.337588	0.3196036	0.393506	0.369348	0.366592	0.3416568
C	0.6373	0.5566	0.6423	0.5545	0.4634	0.3734	0.4818	0.4039	0.5736	0.5022	0.5277	0.45305
C+All	0.5655	0.487884	0.568228	0.488928	0.406008	0.326292	0.429036	0.356452	0.512492	0.440172	0.470764	0.398312
C+Nv	0.63942	0.57032	0.63826	0.57218	0.46272	0.38956	0.48344	0.42082	0.57628	0.51424	0.52986	0.46753
C+Nv+An	0.63897	0.58141	0.63893	0.58184	0.46515	0.40204	0.48643	0.43315	0.57839	0.52495	0.53241	0.47905
Cb	0.6257	0.4736	0.6308	0.4829	0.4624	0.2969	0.4679	0.3022	0.5618	0.4077	0.51485	0.35495
Cb+A	0.6257	0.4736	0.6308	0.4829	0.4624	0.2969	0.4679	0.3022	0.5618	0.4077	0.51485	0.35495
Cb+A+A	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	#VALEURI	#VALEURI
Cb+A+Ag	0.64131	0.5243325	0.64151	0.511725	0.4792	0.3510275	0.491945	0.3653925	0.5807875	0.4605325	0.5363625	0.4129625
Cb+A+H	0.64432	0.542235	0.64186	0.53164	0.47241	0.363925	0.4931	0.380495	0.57993	0.48016	0.536515	0.4303225
Cb+Ac	0.63308	0.50604	0.63408	0.49836	0.46802	0.33172	0.48434	0.3486	0.57366	0.44768	0.529	0.39723
Cb+Ag+A	0.64354	0.53156	0.64304	0.5187	0.4816	0.35676	0.49538	0.37442	0.5835	0.46808	0.53944	0.42125
Cb+Ag+Sg	0.64782	0.548565	0.64716	0.53595	0.47684	0.373755	0.50085	0.395385	0.588855	0.487645	0.5448525	0.441515
Cb+Fl	0.63922	0.5078	0.63668	0.49954	0.4664	0.32878	0.4767	0.33965	0.57536	0.44358	0.52603	0.39163
Cb+Mt	0.63206	0.48496	0.63592	0.4773	0.47016	0.31608	0.486	0.3342	0.57314	0.4258	0.52957	0.38
Cb+Mt+All	0.58689	0.484362	0.599904	0.459234	0.439724	0.303031	0.457873	0.322816	0.542111	0.409161	0.499992	0.3659885
Cb+Sg	0.64318	0.53856	0.64516	0.5253	0.46248	0.35782	0.49258	0.38024	0.58336	0.47702	0.53797	0.42863
Cb+TN/S+Mt	0.466937	0.350103	0.471543	0.343002	0.286868	0.21742	0.352261	0.2293277	0.425117	0.305726	0.388689	0.26752685
Ce	0.6358	0.45095	0.6428	0.45795	0.47195	0.28615	0.4739	0.30265	0.5725	0.4007	0.5232	0.351675
Ce-a	0.6351	0.4301	0.6452	0.4367	0.482	0.2852	0.4912	0.2987	0.5697	0.3823	0.53045	0.3405
Ce-a+R-l	0.41138	0.265836	0.67888	0.268808	0.2897472	0.17112	0.30186	0.17922031	0.364104	0.2296782	0.332982	0.20444926
Ce+Ac	0.63914	0.49245	0.64128	0.49539	0.47375	0.32527	0.48794	0.34707	0.58008	0.44346	0.53401	0.395265
Ce+Ba	0.63856	0.51165	0.64244	0.51913	0.46725	0.34309	0.47866	0.38287	0.5795	0.46062	0.52908	0.411745
Ce+cm	0.63456	0.47101	0.64192	0.47489	0.46797	0.30045	0.47286	0.32227	0.5721	0.41934	0.52248	0.370805
Ce+D	0.63324	0.45085	0.63576	0.45393	0.46485	0.27145	0.46886	0.29539	0.56546	0.38598	0.51716	0.340685
Ce+J	0.63736	0.49163	0.6438	0.4941	0.47867	0.33063	0.49284	0.35565	0.58162	0.44406	0.53718	0.399855
Ce+Lr	0.523238	0.34894	0.528156	0.354206	0.374944	0.1951274	0.388128	0.221534	0.471954	0.308462	0.430041	0.264998
Cm	0.6327	0.5011	0.6406	0.5003	0.462	0.3219	0.4713	0.3517	0.5715	0.4473	0.5214	0.3995
Cm+B	0.43178	0.338184	0.44236	0.34134	0.295608	0.1955988	0.33542	0.229884	0.39838	0.301668	0.3669	0.265776
Cm+Ce	0.63394	0.48104	0.64148	0.48336	0.46598	0.31186	0.47234	0.33208	0.5719	0.42866	0.52212	0.38037
D	0.6294	0.4507	0.6252	0.4479	0.4542	0.2494	0.4613	0.2845	0.5549	0.3639	0.5081	0.3242
D+B	0.4298	0.307944	0.43312	0.3099	0.290928	0.1520988	0.32942	0.189564	0.38842	0.251628	0.35892	0.220596
D+Pc	0.62812	0.43174	0.6304	0.43354	0.45388	0.24224	0.4661	0.2741	0.55754	0.35814	0.51182	0.31612
D+Pc+All	0.59412	0.423302	0.595484	0.425664	0.427104	0.245276	0.442618	0.276856	0.530066	0.356226	0.486342	0.316541
De	0.63945	0.59415	0.63815	0.59375	0.4813	0.42945	0.52235	0.4717	0.5936	0.548	0.557975	0.50985

De+All	0.56679	0.510414	0.565738	0.512478	0.416748	0.359922	0.453366	0.397132	0.524492	0.467652	0.488929	0.432392
De+Mo	0.64705	0.58121	0.64177	0.57661	0.48218	0.41391	0.52353	0.4569	0.6001	0.53068	0.561815	0.49379
De+Mt	0.64031	0.55729	0.64033	0.55581	0.4815	0.39561	0.51867	0.4359	0.59222	0.50998	0.555445	0.47294
De+Mt+TNVS	0.529383	0.456277	0.530437	0.454393	0.3859412	0.31818	0.425674	0.3517018	0.451303	0.417406	0.4584365	0.3845564
De+Mo+mar	0.534439	0.474217	0.531517	0.469993	0.3864512	0.331905	0.429219	0.3674518	0.497213	0.432934	0.463216	0.4001929
De+Lu	0.65843	0.62401	0.65033	0.61693	0.4827	0.44111	0.52161	0.48322	0.60972	0.57016	0.565665	0.52669
Fa	0.6351	0.2963	0.6267	0.2897	0.4602	0.1099	0.4564	0.1672	0.5494	0.2566	0.5029	0.2119
Fa+Ber	0.63626	0.43026	0.6311	0.4261	0.46452	0.25142	0.47988	0.30428	0.56588	0.3854	0.52288	0.34484
Fa+Bx+Nv	0.63969	0.46166	0.63116	0.45806	0.46704	0.28198	0.48372	0.32863	0.5701	0.41191	0.52691	0.37027
Fi	0.642	0.5586	0.6455	0.5545	0.4724	0.3766	0.4899	0.3959	0.5957	0.4974	0.5428	0.44665
Fi+I-f	0.65676	0.60304	0.65226	0.59642	0.47984	0.42132	0.5099	0.4479	0.60286	0.54432	0.55638	0.49611
Gr	0.6353	0.5079	0.6407	0.5014	0.4678	0.3174	0.4748	0.3575	0.56	0.4481	0.5174	0.4028
I	0.6789	0.6697	0.6624	0.6593	0.491	0.4884	0.5399	0.5259	0.6136	0.6147	0.57675	0.5703
I-f	0.6789	0.6697	0.6624	0.6593	0.491	0.4884	0.5399	0.5259	0.6136	0.6147	0.57675	0.5703
I+Bev	0.66262	0.6011	0.65488	0.59402	0.48592	0.4258	0.53362	0.46178	0.60564	0.54582	0.56963	0.5038
I+Mo	0.67072	0.62654	0.65632	0.61594	0.488	0.44928	0.53406	0.48942	0.6121	0.5707	0.57308	0.53006
J	0.6397	0.55265	0.6452	0.5482	0.4887	0.3973	0.5212	0.4351	0.595	0.5091	0.5581	0.4721
J+An	0.6389	0.58327	0.6433	0.5789	0.48313	0.42081	0.51227	0.45577	0.59203	0.53378	0.55215	0.494775
J+S+Sm	0.63195	0.397675	0.636	0.3949	0.470515	0.2528182	0.493095	0.289435	0.572945	0.357754	0.53302	0.3235945
J+Sm	0.62774	0.35199	0.6312	0.3494	0.46869	0.2392364	0.50151	0.26591	0.57727	0.319748	0.53939	0.292829
J+Sm+Cm	0.62933	0.391845	0.6338	0.3895	0.468355	0.2650948	0.496455	0.29153	0.577005	0.354726	0.53673	0.323128
J+Up	0.64186	0.56239	0.6451	0.5584	0.47957	0.39769	0.51371	0.43357	0.58883	0.51086	0.55127	0.47215
Jy	0.07889	0.005876	0.07831	0.004822	0.01205	0	0.0232	0.0000058	0.04172	0.0002961	0.03246	0.00015095
Jy-g	0.07889	0.005876	0.07831	0.004822	0.01205	0	0.0232	0.0000058	0.04172	0.0002961	0.03246	0.00015095
Jy+Pn	0.09193	0.0047688	0.086634	0.0036936	0.023058	3.7724E-06	0.027596	2.1708E-05	0.054188	0.00037838	0.040892	0.00020004
Jy+Ty+Pn	0.17602	0.03930756	0.169799	0.0388349	0.081259	0.00649089	0.0946365	0.01382401	0.133808	0.02941381	0.11422225	0.02161891
Lc	0.6386	0.5008	0.6337	0.5292	0.4661	0.3184	0.4645	0.3444	0.5651	0.4514	0.5148	0.3979
Lo+All	0.56628	0.454404	0.563068	0.473748	0.407628	0.293292	0.418656	0.320752	0.507392	0.408692	0.463024	0.365222
Lr	0.354395	0.195925	0.35619	0.19859	0.229435	0.0585935	0.25947	0.09986	0.321135	0.170105	0.2903025	0.1349825
Lr-e	0.3544	0.19595	0.35619	0.19859	0.229435	0.0585935	0.25947	0.09986	0.321135	0.170105	0.2903025	0.1349825
Lr-r	0.3544	0.19595	0.35619	0.19859	0.229435	0.0585935	0.25947	0.09986	0.321135	0.170105	0.2903025	0.1349825
Lr+Ce	0.466957	0.297935	0.470834	0.302334	0.326441	0.1496161	0.345242	0.180976	0.421681	0.262343	0.3834615	0.2216595
Lr+Cm	0.465717	0.317995	0.469954	0.319274	0.322461	0.1667561	0.344202	0.200596	0.421281	0.280983	0.3827415	0.2407895
Lr+Jr	0.468517	0.338615	0.4718	0.3385	0.333161	0.1940961	0.364182	0.233976	0.430701	0.305703	0.3974415	0.2698395
Lr+Nv	0.469677	0.353915	0.466594	0.358634	0.322341	0.2006761	0.350042	0.238396	0.424801	0.314983	0.3874215	0.2766895
Lr-R	0.242957	0.125331	0.505474	0.125942	0.1382082	0.0351561	0.162822	0.05991631	0.214965	0.1023612	0.1888935	0.08113876
Lu	0.6869	0.6688	0.6686	0.6517	0.4848	0.4586	0.5205	0.5005	0.6339	0.6034	0.5772	0.55195
Lu+De+mar	0.552463	0.521247	0.544027	0.511823	0.3875412	0.358135	0.427409	0.3929518	0.512488	0.473624	0.4699485	0.4332879
Lu+De+Mo	0.666975	0.625005	0.655185	0.614155	0.48349	0.436255	0.522015	0.4787	0.617	0.56704	0.5695075	0.52287
mar	0.06589	0.04301	0.0914	0.03924	0.009756	0	0.05227	0.005969	0.09729	0.03762	0.06978	0.0217895
mar+Fi	0.305574	0.144326	0.305526	0.139424	0.1363336	0.04396	0.313522	0.0704554	0.272134	0.125612	0.243028	0.0978337
Mb+Mt	0.66272	0.56224	0.65776	0.55182	0.48708	0.39306	0.52932	0.4353	0.60536	0.5083	0.56734	0.4718
Mb+Mt+A	0.66272	0.56224	0.65776	0.55182	0.48708	0.39306	0.52932	0.4353	0.60536	0.5083	0.56734	0.4718
Mb+De	0.66186	0.5991	0.65558	0.58976	0.48688	0.4269	0.533	0.4711	0.60674	0.54632	0.56987	0.50871
Mc	0.6407	0.6205	0.6448	0.6212	0.4658	0.4466	0.502	0.4826	0.5915	0.5732	0.54675	0.5279
Mc+Fa	0.63846	0.49082	0.63756	0.4886	0.46356	0.31192	0.48376	0.35644	0.57466	0.44656	0.52921	0.4015
Mc+Nv	0.64146	0.60866	0.63976	0.6122	0.46416	0.43348	0.49556	0.46804	0.58702	0.55684	0.54129	0.51244
Mo	0.65845	0.5618	0.6472	0.5509	0.4835	0.3906	0.5253	0.4347	0.60985	0.5047	0.567575	0.4697
Mo+Ac	0.65273	0.55896	0.64392	0.55116	0.48068	0.38774	0.511878	0.4263	0.60249	0.50586	0.560635	0.46608
Mo+All	0.57819	0.491004	0.571168	0.486768	0.418068	0.336612	0.455196	0.374932	0.534242	0.441672	0.494689	0.408302
Mo+De	0.65085	0.57474	0.64358	0.56804	0.48262	0.40614	0.52412	0.4495	0.60335	0.52202	0.563735	0.48576
Mo+De+Lu	0.65844	0.592905	0.648765	0.583915	0.4831	0.415855	0.523455	0.45896	0.609785	0.53743	0.56662	0.498185
Mo+I-f	0.66663	0.60496	0.65328	0.59426	0.4865	0.42972	0.53114	0.47118	0.61135	0.5487	0.571245	0.50994
Mo+Lu	0.66983	0.6046	0.65576	0.59122	0.48402	0.4178	0.52338	0.46102	0.61947	0.54418	0.571425	0.5026
Mo+Mt	0.65171	0.53788	0.64576	0.5301	0.48282	0.3723	0.52044	0.4137	0.60197	0.484	0.561205	0.44885
Mo+Mt+A	0.65171	0.53788	0.64576	0.5301	0.48282	0.3723	0.52044	0.4137	0.60197	0.484	0.561205	0.44885
Mo+Mt+De	0.649595	0.55033	0.64431	0.54387	0.48255	0.384645	0.521065	0.42635	0.60069	0.497835	0.4620925	0.429025
Mo+Mt+Ry-m	0.649465	0.54596	0.64528	0.5386	0.48069	0.379175	0.514555	0.41713	0.59719	0.491535	0.5558725	0.4543325
Mo+P	0.65345	0.58018	0.64608	0.55166	0.485	0.39462	0.52598	0.44086	0.60575	0.50852	0.565865	0.47469
Mo+P+Mt	0.65133	0.548625	0.64564	0.54107	0.484285	0.384465	0.52338	0.42882	0.602835	0.497215	0.5631075	0.4630175
Mt	0.6416	0.502	0.6436	0.4989	0.4818	0.34485	0.51315	0.3822	0.59015	0.45295	0.55165	0.417575
Mt+All	0.56808	0.455124	0.569008	0.455568	0.417048	0.309162	0.447846	0.343432	0.522422	0.410622	0.485134	0.377027
Mt+Cb+All	0.60007	0.00534931	0.602464	0.0052935	0.443604	0.00257753	0.466923	0.00297625	0.547781	0.00430886	0.507352	0.00364205
Mt+Fi	0.64176	0.52464	0.64436	0.52114	0.47804	0.35755	0.50385	0.38768	0.59237	0.47073	0.54811	0.429205
Mt+Fi+Cb	0.63854	0.00667633	0.64161	0.0066753	0.4751	0.00336909	0.497125	0.0037703	0.586145	0.00538753	0.541635	0.00457891
Mt+I+Cb	0.64961	0.00737149	0.64668	0.0073364	0.48068	0.00388605	0.512125	0.00437857	0.591515	0.00604652	0.55182	0.00521254
Mt+Mb	0.65568	0.54216	0.65304	0.53418	0.48532	0.37699	0.52393	0.4176	0.60029	0.48985	0.56211	0.453725
Mt+Mo	0.64834	0.52592	0.64504	0.5197	0.48248	0.36315	0.51801	0.4032	0.59803	0.47365	0.55802	0.438425
Mt+Mo+I-f	0.654115	0.55348	0.64844	0.54658	0.48415	0.387285	0.522145	0.42669	0.60075	0.500825	0.5614475	0.4637575
Mt+Mo+P	0.647525	0.53109	0.64484	0.52528	0.4834	0.369735	0.519565	0.41153	0.59795	0.480735	0.5587575	0.4461325
Mt+Ry	0.64048	0.53012	0.64336	0.5263	0.47788	0.36775	0.452495	0.36134	0.525515	0.433075	0.489005	0.3972075
Nv	0.6426	0.5909	0.6322	0.5987	0.4617	0.4138	0.4859	0.4462	0.5803	0.5323	0.5331	0.48925
Nv+C	0.64048	0.57718	0.63624	0.58102	0.46238	0.39764	0.48426	0.42928	0.57762	0.52026	0.53094	0.47477
Nv+Mc	0.64184	0.60274	0.63724	0.6077	0.46334	0.42692	0.49234	0.46076	0.58478	0.54866	0.53856	0.50471
Nv+Tb	0.6426	0.60558	0.63144	0.6151	0.46562	0.4318	0.49294	0.46164	0.58382	0.54238	0.53838	0.50201
Nv+TNVS	0.419916	0.371744	0.415884	0.374916	0.278524	0.24828	0.312448	0.2701036	0.389096	0.334428	0.347772	0.3022656
Nv+TN+Ac	0.419916	0.371744	0.415884	0.374916	0.278524	0.24828	0.312448	0.2701036	0.389096	0.334428	0.347772	0.3022656
P	0.64595	0.5										

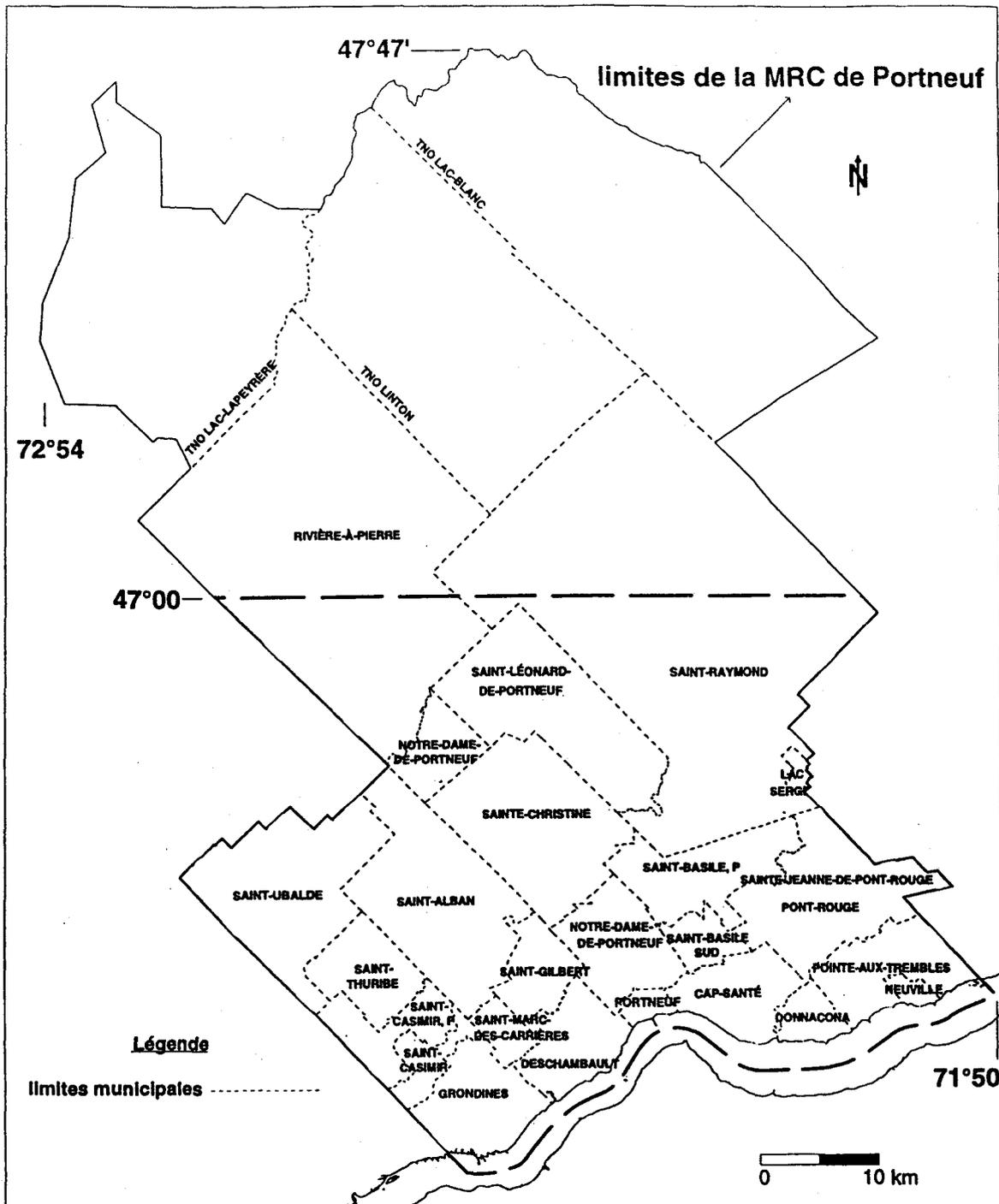


ANNEXE V

Cartes pour la localisation

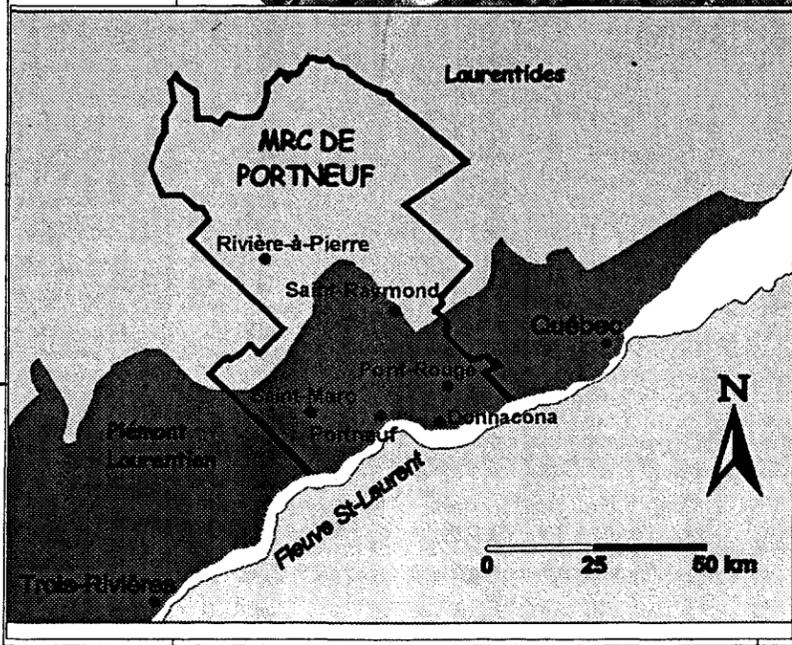
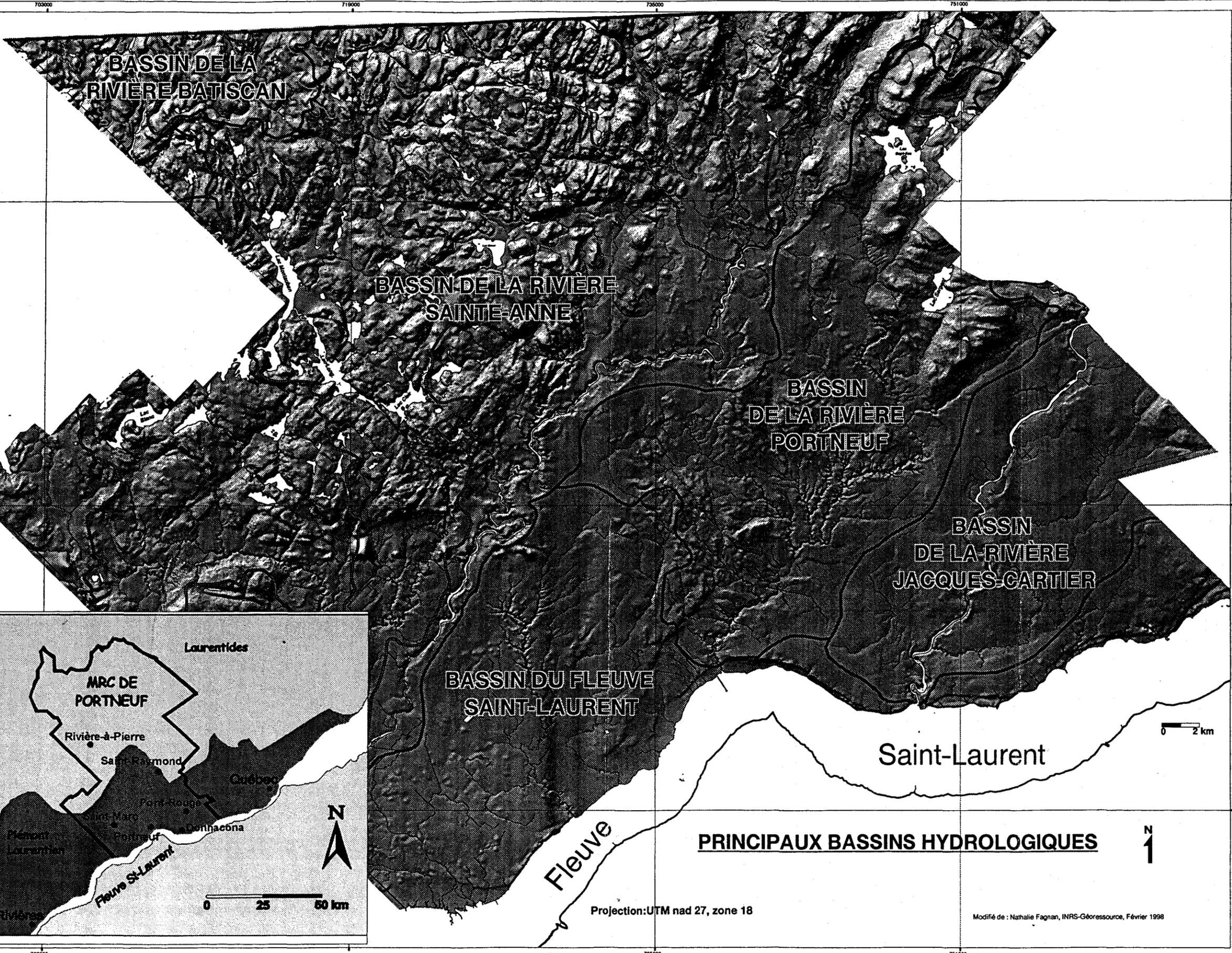
- Carte des limites de Municipalité

- Carte de localisation et carte des bassins hydrologiques



Municipalités composant la MRC de Portneuf (tiré de Fagnan, 1998)





PRINCIPAUX BASSINS HYDROLOGIQUES

Projection: UTM nad 27, zone 18

Modifié de : Nathalie Fagnan, INRS-Géoresource, Février 1998

ANNEXE VI

Carte des formations superficielles

LÉGENDE

QUATERNAIRE

ENVIRONNEMENTS CONTINENTAUX

SÉDIMENTS ORGANIQUES

 Dépôts organiques

SÉDIMENTS ALLUVIAUX

 Ap Alluvions actuelles

 At Alluvions des terrasses fluviales

SÉDIMENTS DU LAC LAMPSILIS

 Ld Sédiments deltaïques

 Lb Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation

ENVIRONNEMENTS MARINS ET ESTUARIENS

SÉDIMENTS MARINS

 Md Sédiments deltaïques

 Mb Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation

 Mg Sédiments marins fins remaniés

 Ma Sédiments fins d'eau profonde

ENVIRONNEMENTS GLACIAIRE ET PROGLACIAIRE

SÉDIMENTS FLUVIOGLACIAIRES

 Go Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien

 Gs Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique

 Gx Sédiments juxtaglacières

SÉDIMENTS GLACIAIRES

 GxT Sédiments de la moraine frontale de Saint-Narcisse

 Tr/Tvr Till remanié

 T Till en couverture généralement continue

 Tv Till en couverture discontinue

WISCONSINIEN MOYEN ET INFÉRIEUR; Sangamonien; Illinoien

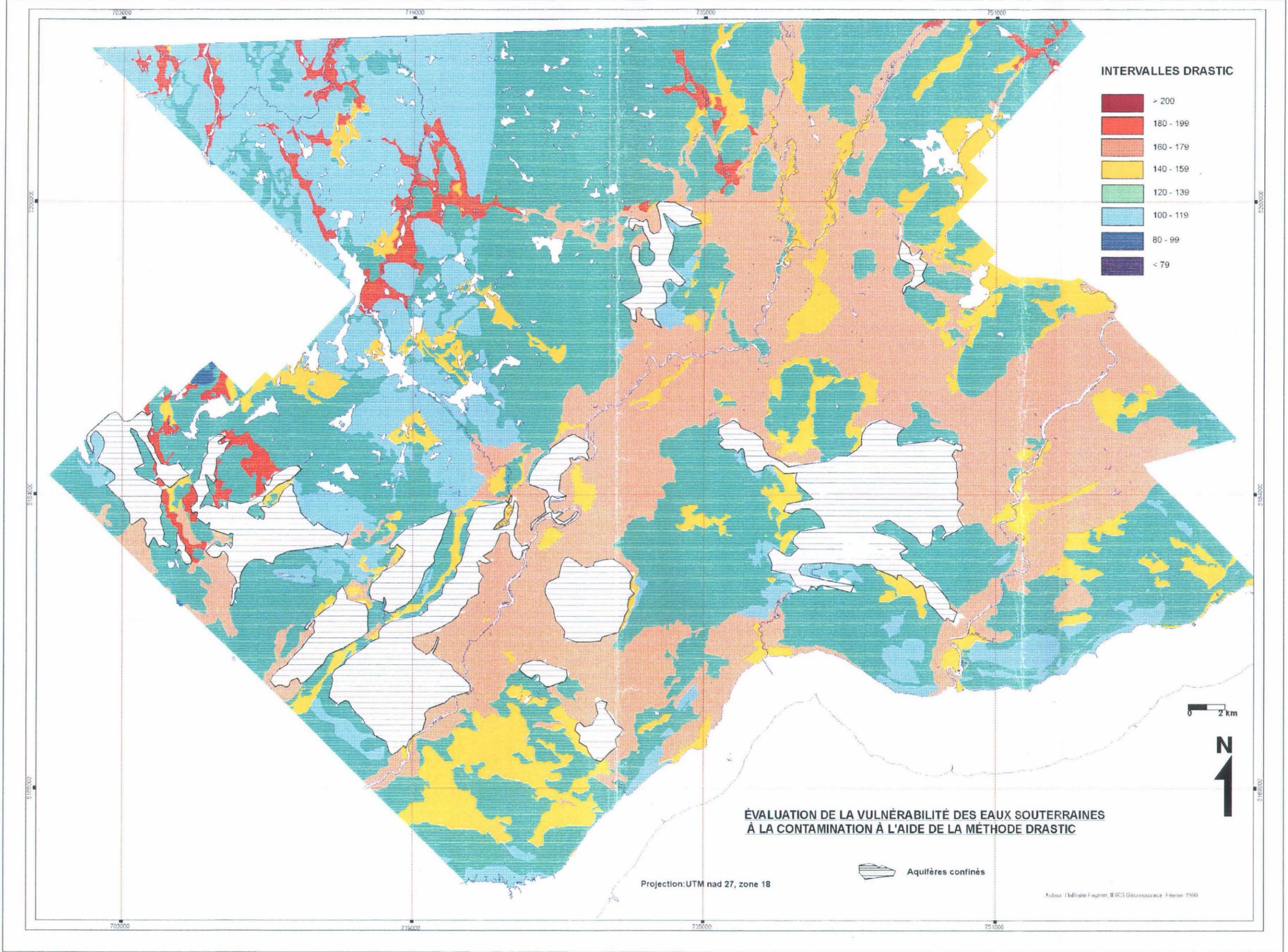
 Q Formations quaternaires non-différenciées

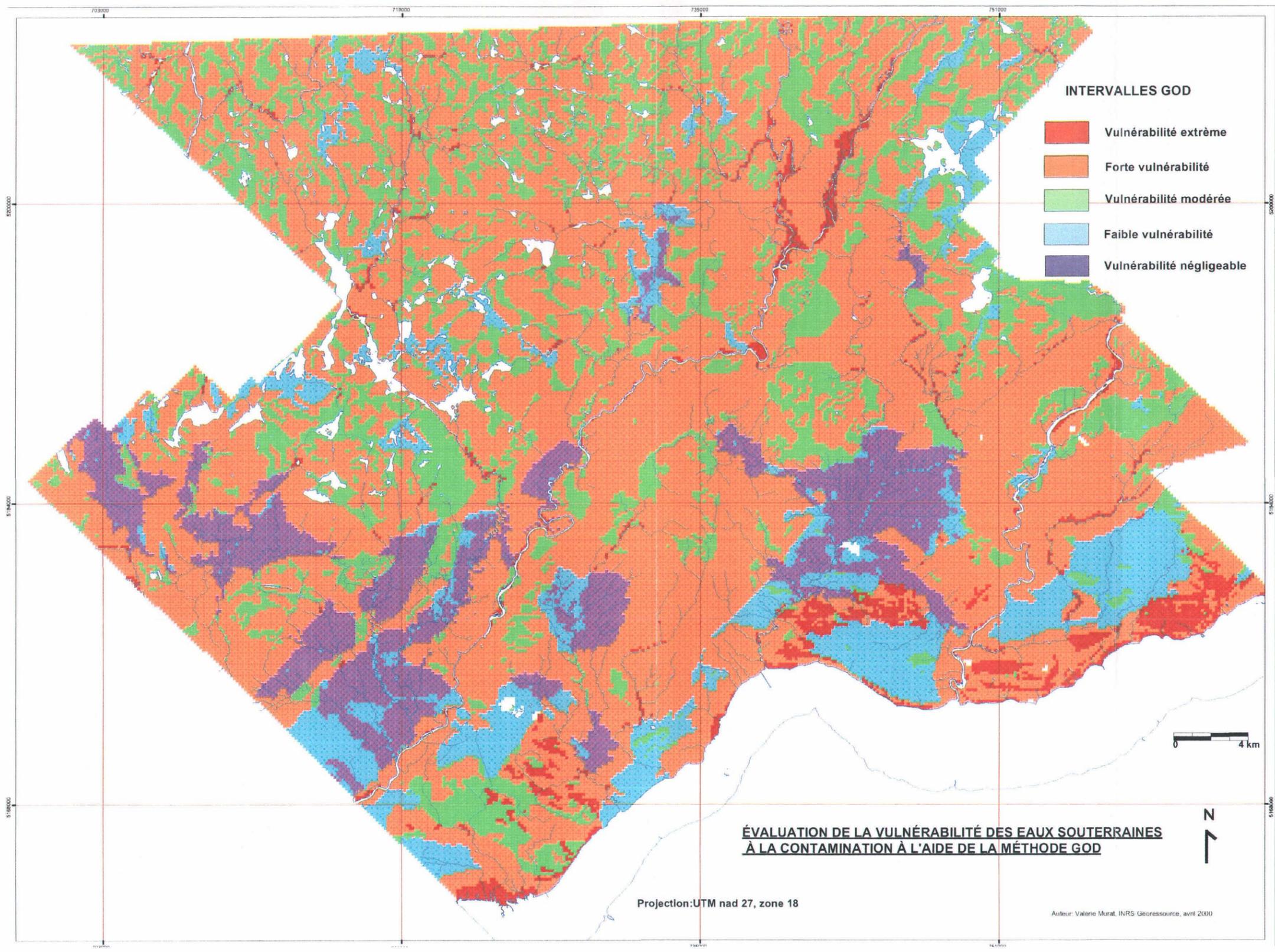
PRÉ-QUATERNAIRE

Substratum Rocheux

Roches sédimentaires paléozoïques

 R Roches ignées et métamorphiques précambriennes





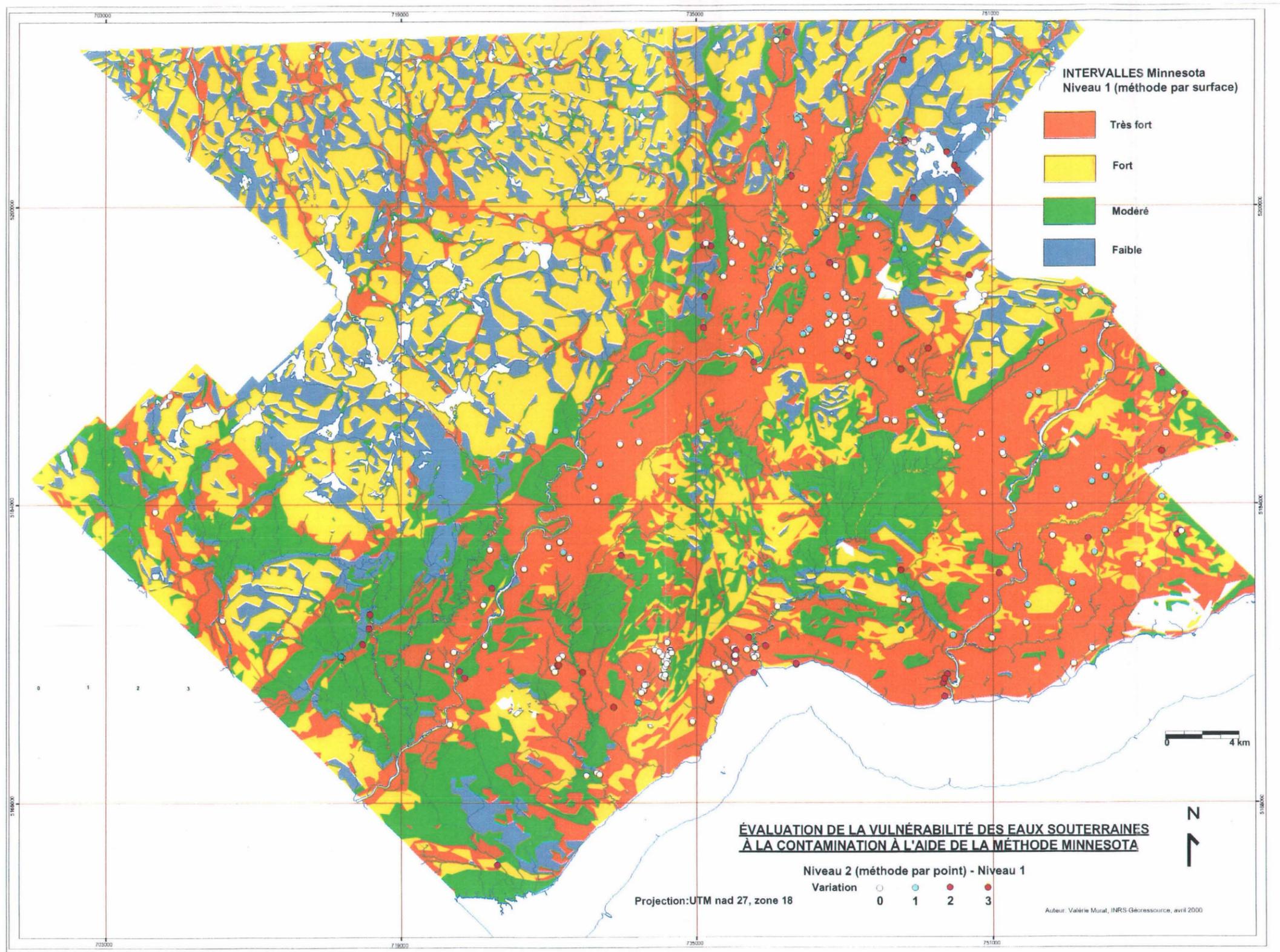
INTERVALLES GOD

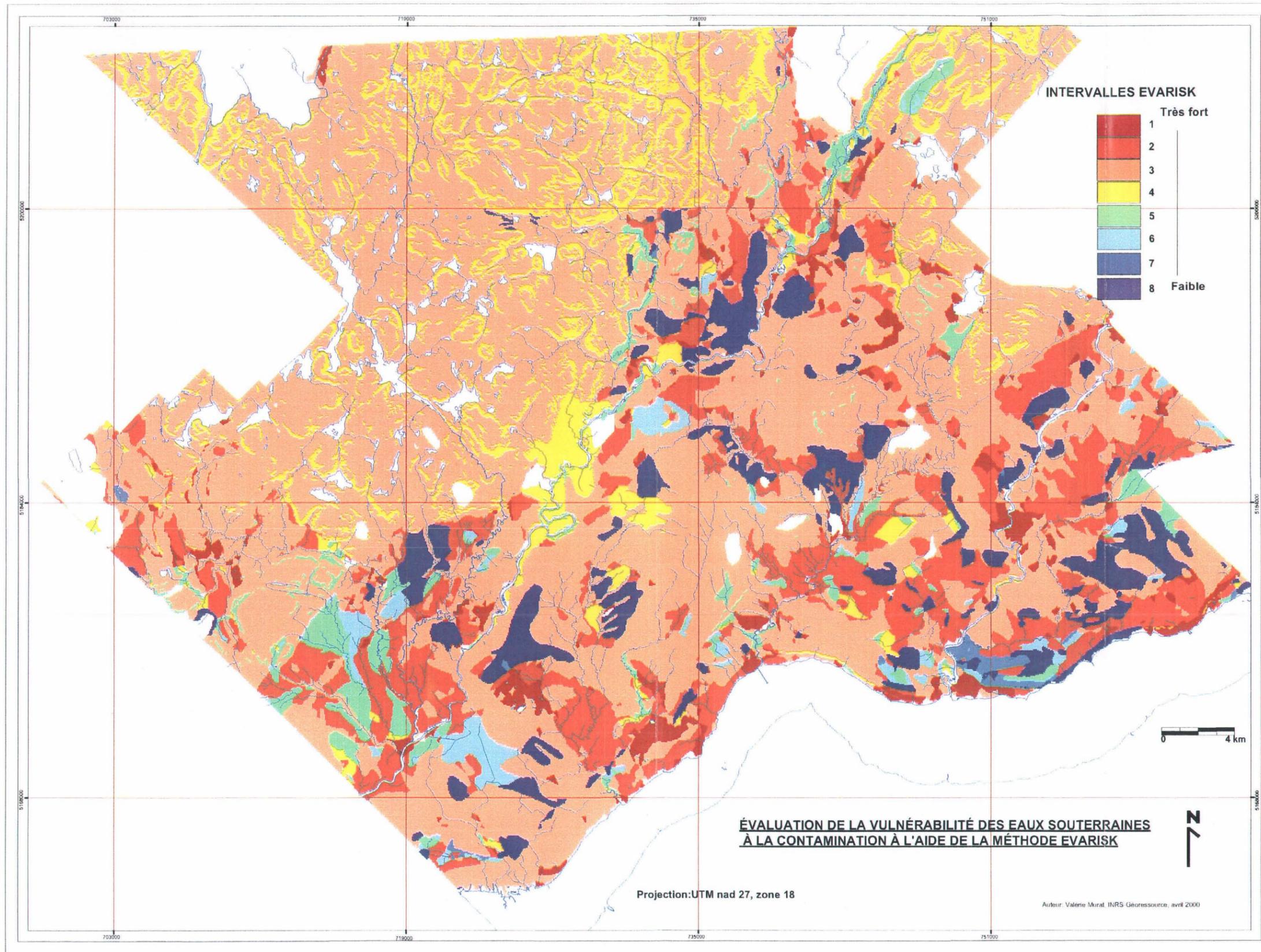
- Vulnérabilité extrême
- Forte vulnérabilité
- Vulnérabilité modérée
- Faible vulnérabilité
- Vulnérabilité négligeable

**ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES
À LA CONTAMINATION À L'AIDE DE LA MÉTHODE GOD**

Projection: UTM nad 27, zone 18

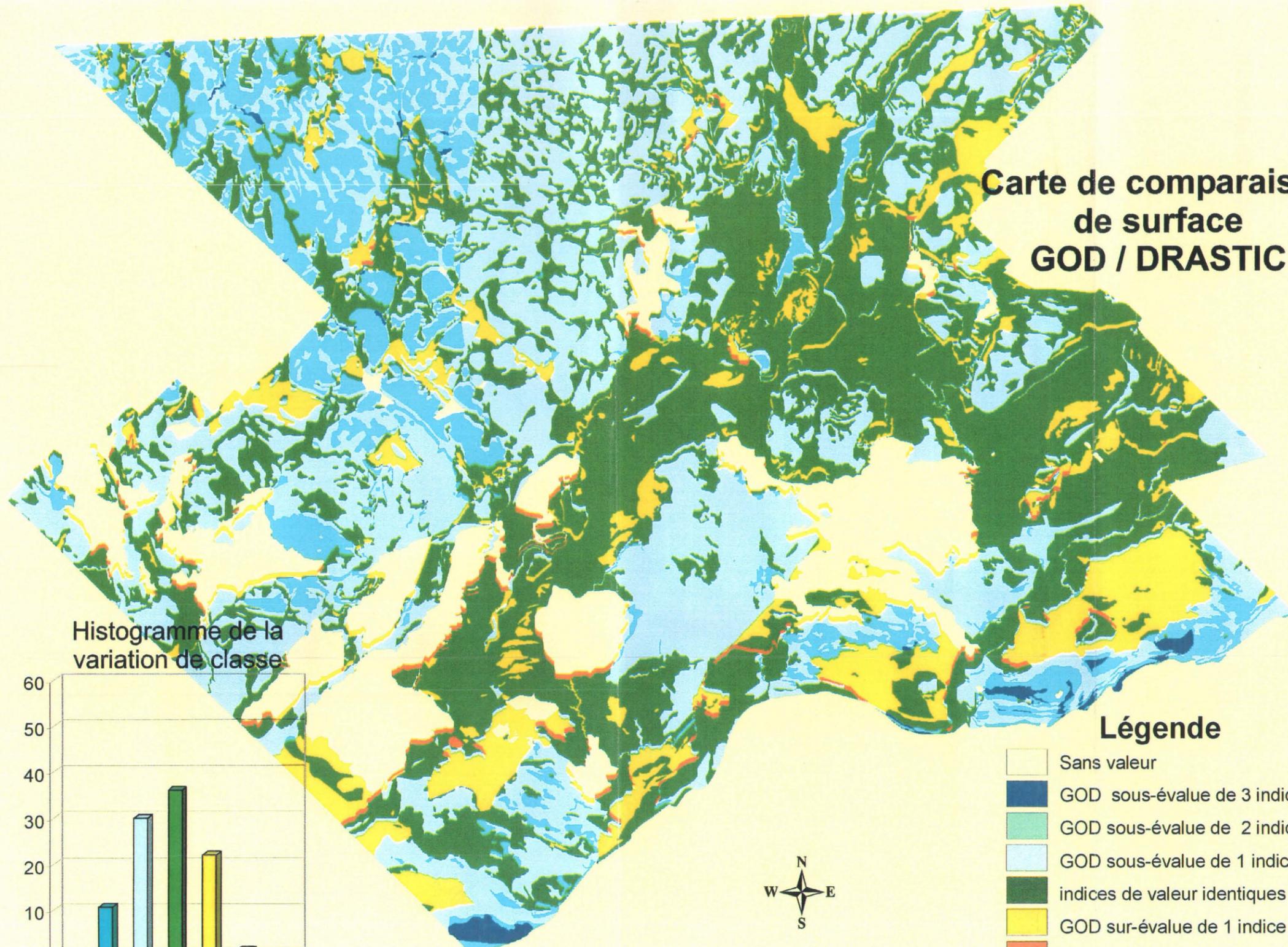
Auteur: Valerie Murat, INRS Georessource, avril 2000



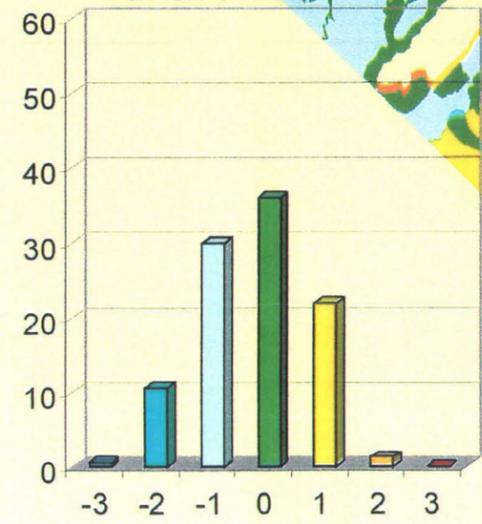


ANNEXE VIII
Cartes de comparaison

Carte de comparaison de surface GOD / DRASTIC



Histogramme de la
variation de classe

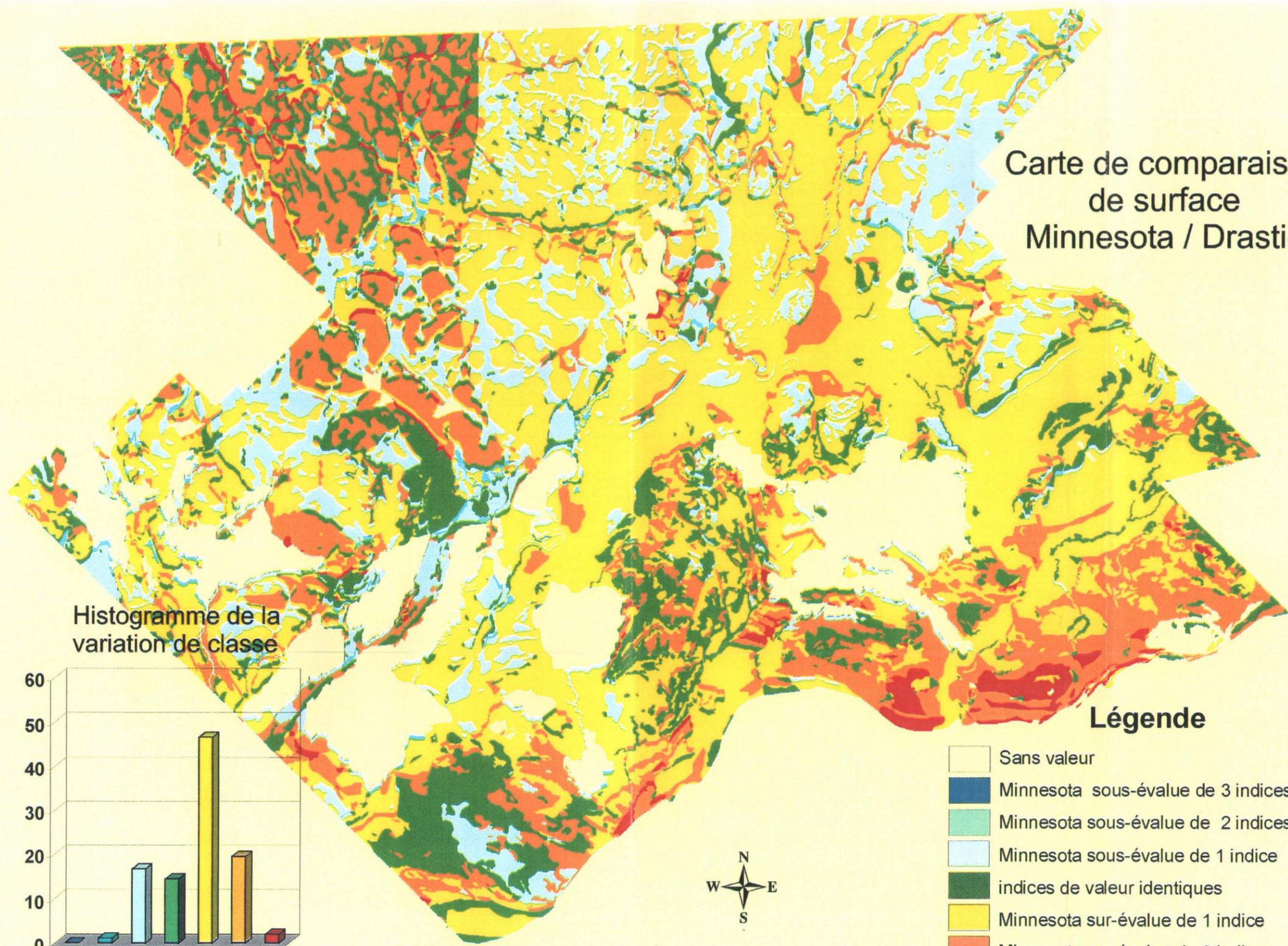


Légende

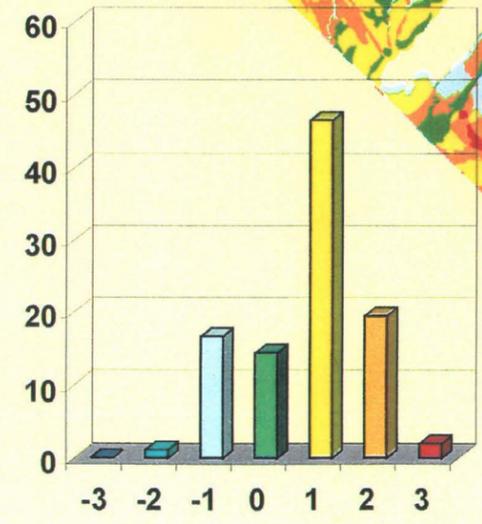
- Sans valeur
- GOD sous-évalue de 3 indices
- GOD sous-évalue de 2 indices
- GOD sous-évalue de 1 indice
- indices de valeur identiques
- GOD sur-évalue de 1 indice
- GOD sur-évalue de 2 indices
- GOD sur-évalue de 3 indices



Carte de comparaison
de surface
Minnesota / Drastic

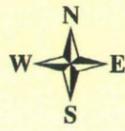


Histogramme de la
variation de classe

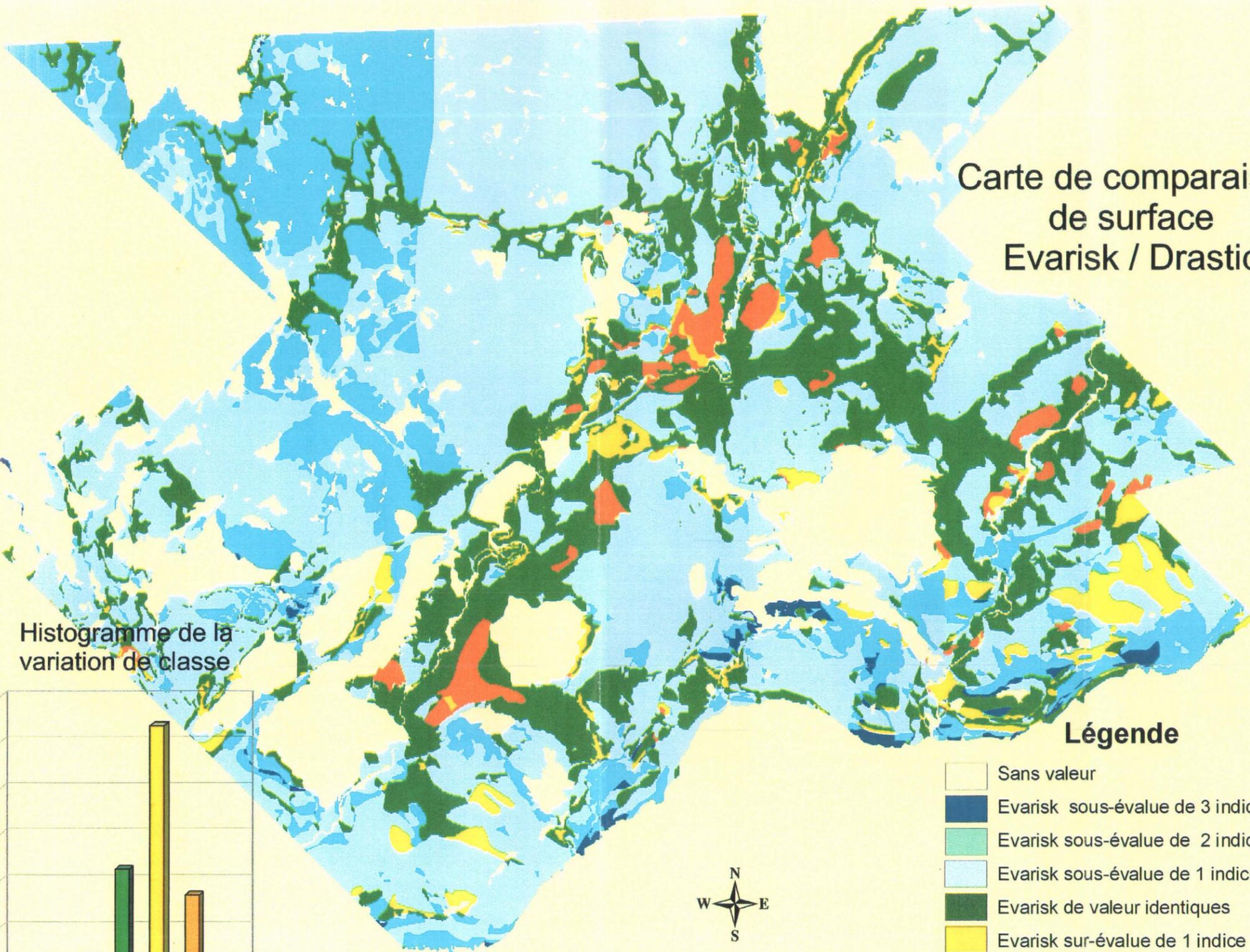


Légende

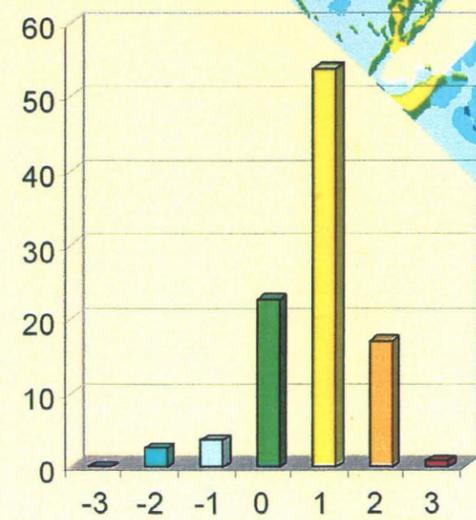
- Sans valeur
- Minnesota sous-évalue de 3 indices
- Minnesota sous-évalue de 2 indices
- Minnesota sous-évalue de 1 indice
- indices de valeur identiques
- Minnesota sur-évalue de 1 indice
- Minnesota sur-évalue de 2 indices
- Minnesota sur-évalue de 3 indices



Carte de comparaison de surface Evarisk / Drastic

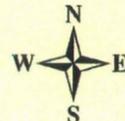


Histogramme de la
variation de classe

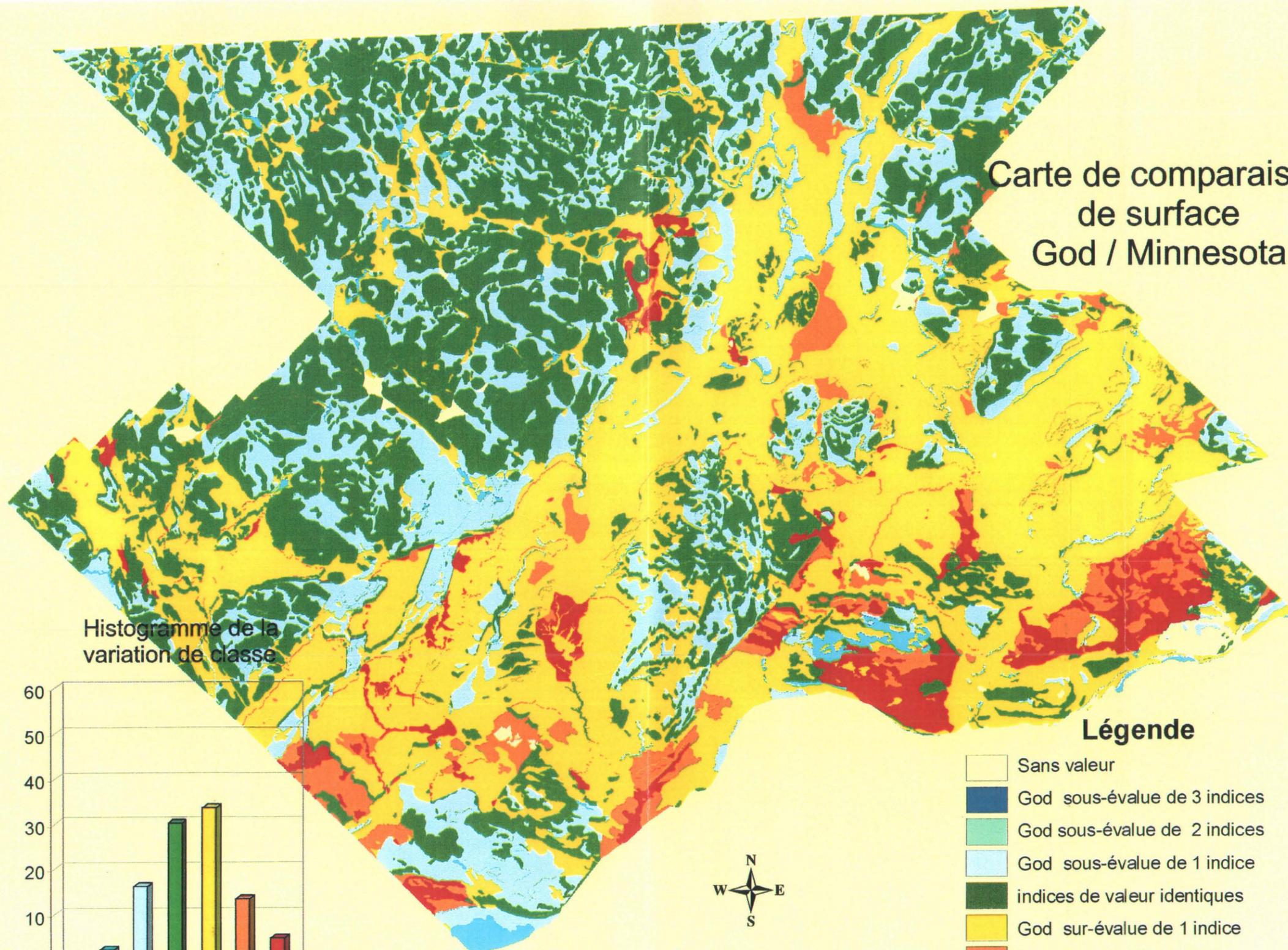


Légende

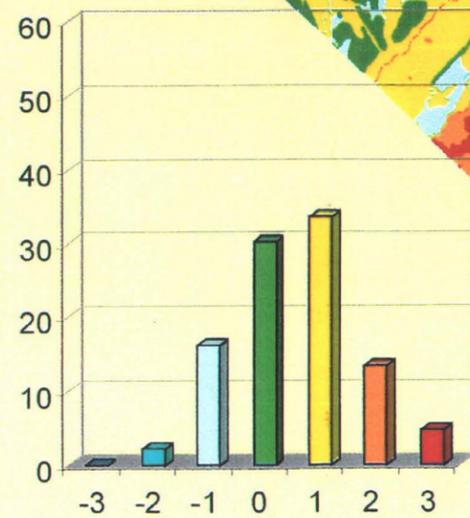
- Sans valeur
- Evarisk sous-évalue de 3 indices
- Evarisk sous-évalue de 2 indices
- Evarisk sous-évalue de 1 indice
- Evarisk de valeur identiques
- Evarisk sur-évalue de 1 indice
- Evarisk sur-évalue de 2 indices
- Evarisk sur-évalue de 3 indices



Carte de comparaison
de surface
God / Minnesota

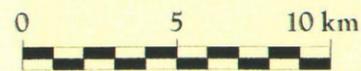


Histogramme de la
variation de classe

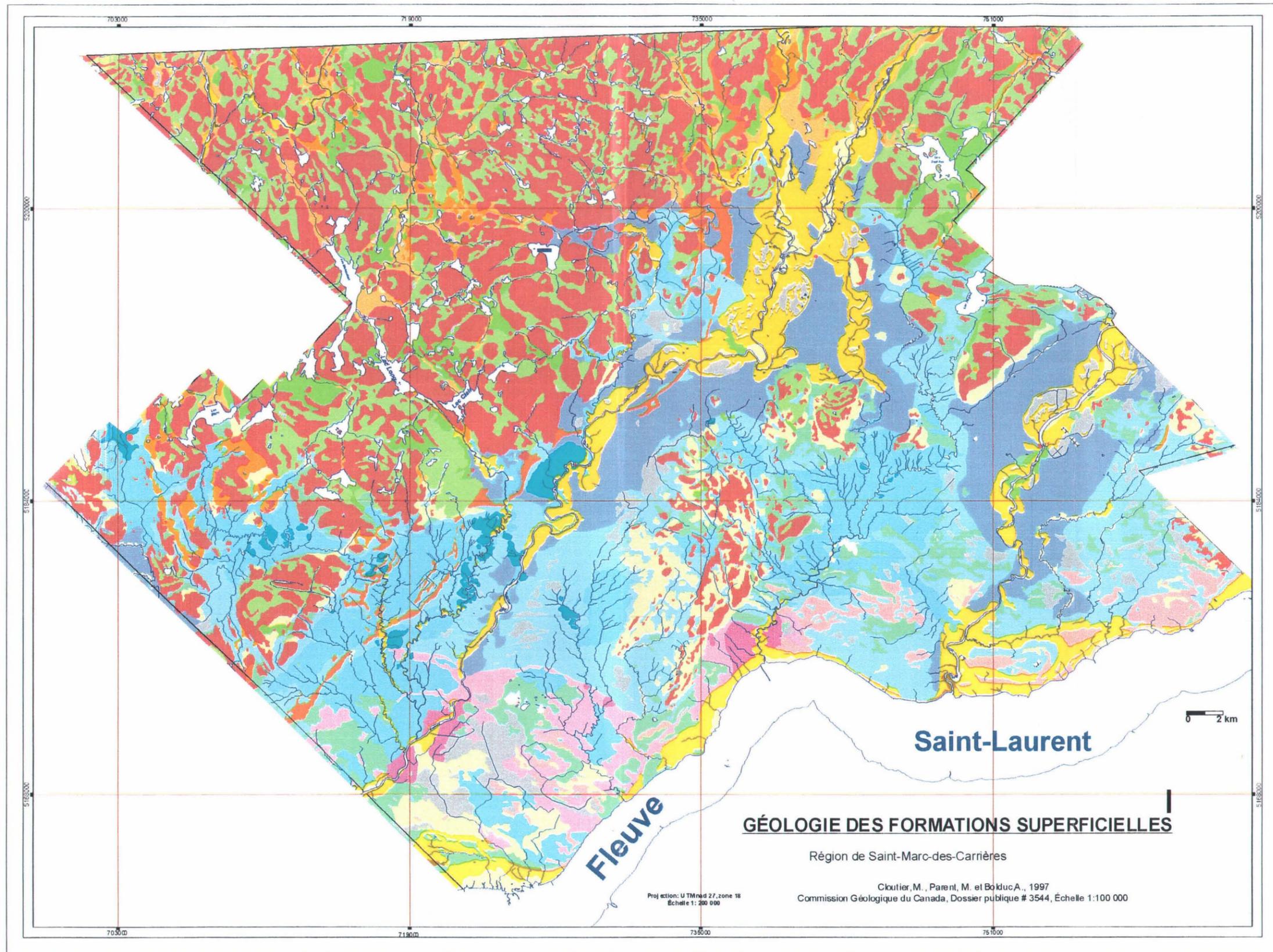


Légende

- Sans valeur
- God sous-évalue de 3 indices
- God sous-évalue de 2 indices
- God sous-évalue de 1 indice
- indices de valeur identiques
- God sur-évalue de 1 indice
- God sur-évalue de 2 indices
- God sur-évalue de 3 indices



ANNEXE VII
Cartes de vulnérabilité



Saint-Laurent

GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Région de Saint-Marc-des-Carières

Cloutier, M., Parent, M. et Bolduc, A., 1997
Commission Géologique du Canada, Dossier public # 3544, Échelle 1:100 000

Fleuve

Projection: UTM Nord 27, zone 18
Échelle 1:200 000

0 2 km