



Étude sur la qualité de l'eau potable  
dans sept bassins versants en surplus de fumier  
et impacts potentiels sur la santé



Caractérisation de l'eau souterraine  
dans les sept bassins versants



**ÉTUDE SUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE  
DANS SEPT BASSINS VERSANTS EN SURPLUS DE FUMIER  
ET IMPACTS POTENTIELS SUR LA SANTÉ**

**CARACTÉRISATION DE L'EAU SOUTERRAINE  
DANS LES SEPT BASSINS VERSANTS**

*Ce document est disponible en version intégrale dans les sites Web suivants :*

[www.menv.gouv.qc.ca](http://www.menv.gouv.qc.ca) [www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca) [www.mapaq.gouv.qc.ca](http://www.mapaq.gouv.qc.ca) [www.msss.gouv.qc.ca](http://www.msss.gouv.qc.ca)

Dépôt légal  
Bibliothèque nationale du Québec, 2004  
ISBN 2-550-43508  
Envirodoq ENV/2004/0312

Document déposé à Santécom <http://www.santecom.qc.ca>  
Cote : MENV-2004-002

© Gouvernement du Québec, 2004

L'Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé a été réalisée conjointement par le ministère de l'Environnement, le ministère de la Santé et des Services sociaux, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et l'Institut national de santé publique du Québec. Elle comprend neuf rapports de recherche et un sommaire.

*Caractérisation de l'eau souterraine dans les sept bassins versants* est un de ces rapports.

#### **AUTEURS**

Pierre Gélinas, Ph. D.	Professeur titulaire d'Hydrogéologie environnementale Département de géologie et de génie géologique, Université Laval
Normand Rousseau, M. Sc.	Direction des politiques de l'eau Ministère de l'Environnement du Québec
Philippe Cantin, Ph. D.	Analyse et étude sur la qualité du milieu Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
Pierrette Cardinal, M. Sc.	Direction des laboratoires d'expertises et d'analyses alimentaires Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
Nadine Roy, ing. jr.	Direction des politiques de l'eau Ministère de l'Environnement du Québec

#### **COLLABORATRICES**

Catherine Fontaine, statisticienne	Direction de la méthodologie, de la démographie et des enquêtes spéciales Institut de la statistique du Québec
Nathalie Plante, statisticienne	Direction de la méthodologie, de la démographie et des enquêtes spéciales Institut de la statistique du Québec



## REMERCIEMENTS

### Comité technique

Le projet a été conçu et réalisé grâce aux efforts d'individus regroupés sous le nom de *comité technique*.

Yolaine Blais	Direction du milieu agricole Ministère de l'Environnement du Québec
Jean-François Boulet	Direction régionale de la Montérégie Ministère de l'Environnement du Québec
Philippe Cantin	Analyse et étude sur la qualité du milieu Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
Pierrette Cardinal	Direction des laboratoires d'expertises et d'analyses alimentaires Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
Albert Daveluy	Direction de la protection de la santé publique Ministère de la Santé et des Services sociaux
Benoît Gingras	Direction de santé publique de Chaudière-Appalaches Ministère de la Santé et des Services sociaux
Richard Laroche	Direction de l'environnement et du développement durable Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
Donald Lemelin	Direction régionale de Chaudière-Appalaches Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
Patrick Levallois	Direction Risques biologiques, environnementaux et occupationnels Institut national de santé publique du Québec et Unité de recherche en santé publique Centre de recherche du CHUL (CHUQ)
Normand Rousseau, coordonnateur	Direction des politiques de l'eau Ministère de l'Environnement du Québec
Marc Simoneau	Direction du suivi de l'état de l'environnement Ministère de l'Environnement du Québec
Hélène Tremblay	Direction des politiques de l'eau Ministère de l'Environnement du Québec
Lucie Veillette	Direction régionale de l'inspection et de santé animale, Montréal, Laval et Lanaudière (DRISA Montréal, Laval et Lanaudière) Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

Le comité technique a bénéficié de la contribution particulière de :

Suzanne Gingras	Unité de recherche en santé publique Centre de recherche du CHUL (CHUQ)
Stéphane Tomat	Direction des politiques de l'eau Ministère de l'Environnement du Québec
Christine Barthe	Direction des laboratoires d'expertises et d'analyses alimentaires Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

### Travaux de terrain

Sans l'implication et la collaboration exceptionnelle des coordonnateurs des *travaux de terrain* dans chacune des régions, le projet n'aurait pu être réalisé :

Véronic Bisson	Direction régionale du Centre-du-Québec Ministère de l'Environnement du Québec
André St-Pierre	Direction régionale du Centre-du-Québec Ministère de l'Environnement du Québec
Claude Magny	Direction régionale de Lanaudière Ministère de l'Environnement du Québec
Benoit Riopel	Direction régionale de Lanaudière Ministère de l'Environnement du Québec
Steven Perron	Direction régionale de Chaudière-Appalaches Ministère de l'Environnement du Québec
Richard Smith	Direction régionale de la Montérégie Ministère de l'Environnement du Québec
Lucie Veillette	Direction régionale de l'inspection et de santé animale, Montréal, Laval et Lanaudière (DRISA Montréal, Laval et Lanaudière) Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
Robert Côté	Direction régionale de l'inspection et de santé animale, Montréal, Laval et Lanaudière (DRISA Montréal, Laval et Lanaudière) Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

Le travail colossal en géomatique pour la sélection des points d'échantillonnage et pour le montage des cartes destinées aux échantillonneurs de l'ensemble des sept bassins versants a été réalisé par :

Pascale Dubois	Direction du suivi de l'état de l'environnement Ministère de l'Environnement du Québec
Brenna Beaulieu	Direction du suivi de l'état de l'environnement Ministère de l'Environnement du Québec

Par sa conception, le projet exigeait une solide organisation au sein des laboratoires impliqués tant au MENV qu'au MAPAQ. Les personnes suivantes ont contribué de façon remarquable à la réussite du projet :

Philippe Cantin	Analyse et étude sur la qualité du milieu Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
Pierrette Cardinal	Direction des laboratoires d'expertises et d'analyses alimentaires Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
Danielle Thomassin	Analyse et étude sur la qualité du milieu Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
Mélanie Robitaille	Analyse et étude sur la qualité du milieu Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
Patrick Beaumont	Analyse et étude sur la qualité du milieu Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec

Les échantillonneurs et échantillonneuses ont fait un travail admirable tout au long du mois d'échantillonnage intensif.

**Chaudière-Appalaches**

Marc Bellavance  
Charles Bolduc  
Danielle Boudreault  
Alain Bouchard  
Diane Gagné  
Philippe Kirouac  
Claude Lessard  
Catherine St-Laurent

**Lanaudière**

Sonia Lefebvre  
Lizanne Lejeune  
Jonathan Masson  
Anick Nantais

**Montérégie**

Caroline Bellemare  
Christian Blanchette  
Duncan Bradley  
Patrick Chevrette  
Annick Desjardins  
Ingrid Godbout  
Yvon Laviolette  
Michel Paquin  
Marjorie G.-Tellier  
Jason Vachon

**Centre-du-Québec**

Mélanie Bellemare  
Mathieu Benoît  
Dany Bolduc  
Dominic Bourgoïn



## RÉSUMÉ

Le projet *Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé* visait à vérifier si les activités d'élevage intensif ont des conséquences sur la qualité des eaux souterraines et sur la santé de la population du Québec. Le projet était constitué de neuf études différentes, la présente portant sur la *Caractérisation de l'eau souterraine dans les sept bassins versants*.

L'étude s'est déroulée sur le territoire de sept bassins versants de rivières dont la qualité de l'eau de surface est détériorée, en particulier par les concentrations excédentaires de phosphore. Pour permettre une évaluation objective des impacts de l'élevage intensif, ce territoire a été divisé en deux zones : (1) une zone témoin représentée par des municipalités où l'activité agricole est faible (utilisation de moins de 25 % du territoire pour l'agriculture et bilan de phosphore négatif), et (2) une zone agricole intensive, représentée par des municipalités où l'activité agricole, culture et élevage, est intensive (utilisation de 25 % ou plus du territoire et bilan de phosphore positif).

Les points d'échantillonnage ont été choisis de façon aléatoire sur l'ensemble du territoire des sept bassins versants. En tout, la campagne d'échantillonnage effectuée en mai 2002 a permis de recueillir 1042 échantillons d'eau dans les puits des particuliers en zone agricole et 218 en zone témoin. Afin de caractériser la variation saisonnière de la contamination, cette campagne a été complétée par la cueillette mensuelle, de juillet à novembre 2002, de quatre-vingt-treize puits situés dans la MRC de Montcalm. Quatre paramètres ont été analysés dans les échantillons d'eau, soit (1) les nitrites-nitrates pour caractériser la contamination chimique, et les microorganismes indicateurs suivants : (2) la bactérie *Escherichia coli*, (3) les bactéries entérocoques, et (4) les virus de type coliphages F-spécifiques.

Les résultats du suivi mensuel montrent que, pour chaque puits, les concentrations en nitrites-nitrates observées sont relativement constantes d'un mois à l'autre, alors que la contamination par les microorganismes est plus fréquente en été avec un maximum d'activité au mois d'août.

L'analyse statistique des résultats de l'échantillonnage du mois de mai, confiée à l'Institut de la statistique du Québec, a comparé les échantillons provenant de la zone agricole avec ceux provenant de la zone témoin. Cette comparaison a été effectuée en considérant deux résultats : premièrement, la proportion d'échantillons dont la concentration en nitrites-nitrates est d'au moins 3 mg/L-N, seuil à partir duquel l'influence des activités humaines sur l'eau souterraine est indéniable; deuxièmement, la proportion d'échantillons comportant la présence d'au moins un indicateur microbiologique (*E. coli*, entérocoques ou virus de type coliphages F-spécifiques).

Pour ce qui est des nitrites-nitrates, la proportion de puits dont la concentration est égale ou supérieure au seuil est significativement plus élevée en zone agricole. Ainsi, les répercussions de l'activité en surface s'y manifestent clairement dans l'eau souterraine. Ces répercussions sont cependant plus faibles dans les puits profonds (probabilité d'observer une teneur d'au moins 3 mg/L-N en zone d'agriculture intensive de 9 %) que dans les captages de sources ou les puits de surface (probabilités de 17 % et 25 %). Cette relation statistiquement significative entre la proportion d'échantillons au-delà du seuil en nitrates et l'intensité agricole s'est manifestée dans chacun des bassins versants à l'étude, sauf dans celui de la rivière L'Assomption.

Le pourcentage de puits contaminés par les microorganismes dans la zone d'agriculture intensive est comparable à celui observé dans la zone témoin. L'analyse statistique n'a pas été en mesure de déterminer s'il y avait un lien entre la présence de microorganismes et l'activité d'élevage intensive.

Dans l'ensemble, la distribution de la contamination dans les puits de surface (moins de huit mètres de profondeur) se distinguait nettement de celle des puits profonds (plus de huit mètres de profondeur). Les installations de captage les plus affectées, tant par des contaminations microbiologiques que par les nitrates, sont des ouvrages de surface : puits peu profonds et captages de sources. De plus, les points contaminés sont indépendants les uns des autres et sont souvent séparés de plusieurs kilomètres de sorte que les sources de contamination sont très locales.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1	ORIGINE DE L'ÉTUDE.....	1
1.2	OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	1
<b>2</b>	<b>MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>3</b>
2.1	DÉFINITION DE ZONE TÉMOIN ET DE ZONE AGRICOLE INTENSIVE.....	3
2.2	CHOIX DES BASSINS VERSANTS.....	3
2.2.1	Bassin de la rivière Bayonne.....	3
2.2.2	Bassin de la rivière Boyer.....	3
2.2.3	Bassin de la rivière Chaudière.....	3
2.2.4	Bassin de la rivière Etchemin.....	4
2.2.5	Bassin de la rivière L'Assomption.....	4
2.2.6	Bassin de la rivière Nicolet.....	4
2.2.7	Bassin de la rivière Yamaska.....	4
2.3	CHOIX DES PARAMÈTRES ANALYSÉS.....	5
2.3.1	Nitrites-nitrates.....	5
2.3.2	<i>Escherichia coli</i> .....	6
2.3.3	Bactéries entérocoques.....	6
2.3.4	Virus de type coliphages F-spécifiques.....	6
2.3.5	Protocole d'échantillonnage des puits.....	7
2.4	PÉRIODE D'ÉCHANTILLONNAGE ET CHOIX DES LABORATOIRES.....	8
<b>3</b>	<b>RÉSULTATS DES ANALYSES.....</b>	<b>9</b>
3.1	RÉPARTITION DES ANALYSES PAR ZONES ET TYPES DE PUIITS.....	9
3.2	ANALYSE DES NITRITES-NITRATES.....	9
3.3	ANALYSE DE LA CONTAMINATION BACTÉRIENNE.....	11
3.4	CONTAMINATION SIMULTANÉE PAR LES NITRATES ET LES BACTÉRIES.....	12
3.5	SUIVI SAISONNIER DE LA QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE.....	13
3.5.1	Analyses chimiques : nitrites-nitrates.....	13
3.5.2	Analyses microbiologiques.....	15
<b>4</b>	<b>ANALYSE STATISTIQUE.....</b>	<b>17</b>
4.1	PONDÉRATION DES ÉCHANTILLONS.....	17
4.2	MODÈLE DE RÉGRESSION LOGISTIQUE.....	17
4.3	ANALYSE STATISTIQUE DE LA CONCENTRATION DE NITRATES.....	18
4.4	ANALYSE STATISTIQUE DE LA CONTAMINATION PAR DES BACTÉRIES.....	19

<b>5</b>	<b>DISCUSSION .....</b>	<b>21</b>
5.1	VARIATIONS RÉGIONALES DE LA QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE .....	21
5.1.1	Région de Chaudière-Appalaches.....	21
	5.1.1.1 Bassin de la rivière Boyer .....	21
	5.1.1.2 Bassin de la rivière Etchemin.....	21
	5.1.1.3 Bassin de la rivière Chaudière .....	21
5.1.2	Région du Centre-du-Québec .....	22
	5.1.2.1 Bassin de la rivière Nicolet.....	22
5.1.3	Région de la Montérégie.....	23
	5.1.3.1 Bassin de la rivière Yamaska.....	23
5.1.4	Région de Lanaudière.....	23
	5.1.4.1 Bassin de la rivière L'Assomption.....	23
	5.1.4.2 Bassin de la rivière Bayonne.....	24
5.2	NAPPES LIBRES ET NAPPES CAPTIVES (PUITS DE SURFACE ET Puits PROFONDS).....	24
5.3	CIRCULATION DE L'EAU SOUTERRAINE ET ALIMENTATION EN EAU POTABLE DES RÉSIDENCES ISOLÉES .....	25
5.4	TRANSPORT DES BACTÉRIES ET DES VIRUS .....	25
	5.4.1 Contamination par les bactéries.....	26
	5.4.2 Absence de virus coliphages F-spécifiques .....	27
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>29</b>
6.1	RÉSUMÉ DES FAITS SAILLANTS .....	29
6.2	LES PRINCIPAUX CONSTATS DE L'ÉTUDE .....	30
<b>7</b>	<b>RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>31</b>
	<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>33</b>

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1	Questionnaire utilisé par les échantillonneurs .....	35
ANNEXE 2		
Carte 1	Localisation des bassins versants étudiés.....	47
Carte 2	Nitrates dans les sept bassins versants .....	49
Carte 3	Nitrates dans le bassin versant de la rivière Nicolet .....	51
Carte 4	Nitrates dans les bassins versants des rivières Chaudière, Etchemin et Boyer .....	53
Carte 5	Nitrates dans les bassins versants des rivières L'Assomption et Bayonne .....	55
Carte 6	Nitrates dans le bassin versant de la rivière Yamaska .....	57
Carte 7	Bactéries dans les sept bassins versants .....	59
Carte 8	Bactéries dans le bassin versant de la rivière Nicolet .....	61
Carte 9	Bactéries dans les bassins versants des rivières Chaudière, Etchemin et Boyer.....	63
Carte 10	Bactéries dans les bassins versants des rivières L'Assomption et Bayonne .....	65
Carte 11	Bactéries dans le bassin versant de la rivière Yamaska .....	67
ANNEXE 3	Rapport de l'analyse statistique .....	69

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Variation mensuelle de la concentration en nitrates .....	14
Figure 2	Variation mensuelle de la contamination par des microorganismes.....	16

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau A	Caractéristiques des sept bassins versants .....	5
Tableau B	Nombre et localisation des points d'échantillonnage .....	7
Tableau C	Répartition des analyses par zones et types de puits .....	9
Tableau D	Analyses des nitrates—Zone témoin .....	10
Tableau E	Analyses des nitrates—Zone d'agriculture intensive .....	11
Tableau F	Analyses des <i>E. coli</i> , entérocoques et coliphages—zone témoin .....	11
Tableau G	Analyses des <i>E. coli</i> , entérocoques et coliphages—zone agricole intensive .....	12
Tableau H	Répartition des puits échantillonnés pour le suivi mensuel .....	13
Tableau I	Nitrates - Suivi mensuel de la zone agricole intensive et de la zone témoin .....	14
Tableau J	Suivi mensuel des analyses microbiologiques – Nombre d'événements.....	15
Tableau K	Suivi mensuel des analyses microbiologiques – Répartition mensuelle.....	15
Tableau L	Probabilité prédite de retrouver un puits dont la concentration en nitrates égale ou excède le seuil de 3 mg/L-N selon la zone et le type de puits.....	18
Tableau M	Probabilité prédite de trouver un puits dont la concentration en nitrates égale ou excède le seuil de 3 mg/L-N selon le bassin versant et le type de puits.....	19
Tableau N	Probabilité prédite de trouver un puits avec présence de bactéries selon la zone, le type de puits et le type de site d'entreposage de fumier.....	20



# 1 INTRODUCTION

## 1.1 ORIGINE DE L'ÉTUDE

Au cours des trente dernières années, les techniques agricoles ont évolué très rapidement entraînant la mécanisation poussée et l'usage de produits chimiques dans l'exploitation des terres agricoles. Les activités traditionnelles sont devenues plus spécialisées, surtout dans le domaine de l'élevage. Dans certaines régions du Québec, la concentration plus grande d'animaux par unité de surface crée une pression sur l'environnement et mérite une attention spéciale quant à la qualité de l'eau des secteurs touchés par ces activités intensives.

Le 22 mars 2001, la direction de la santé publique de la région de Chaudière-Appalaches émettait un avis qui recommandait au gouvernement de réaliser une étude approfondie des risques environnementaux et sanitaires associés aux productions animales dans cette région. Le ministre de l'Environnement annonça le jour même que le ministère de l'Environnement (MENV) mettrait sur pied une étude de caractérisation de la qualité de l'eau souterraine, de concert avec l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ).

En région rurale, l'eau souterraine est souvent la seule source d'eau potable et les risques qu'elle soit contaminée justifient pleinement qu'on évalue la situation. La population de ces régions s'approvisionne par des puits individuels ou par un aqueduc alimenté soit par des eaux de surface traitées ou par de l'eau souterraine exploitée collectivement (réseau public ou privé). La portion de l'étude couverte par le présent rapport concerne seulement l'eau souterraine provenant de puits individuels conçus pour alimenter une résidence et ses dépendances dans le cas d'une exploitation agricole.

Historiquement, les études de la qualité de l'eau souterraine étaient liées à une zone problématique existante ou soupçonnée (Gaudreau, 1998; Paradis *et al.*, 1991; Chartrand *et al.*, 1999), ou encore le territoire était sélectionné pour sa grande vulnérabilité (Rudolph *et al.*, 1993; Nolan, 2000; Gangbazo *et al.*, 1993).

L'étude de caractérisation des eaux souterraines couvre quatre régions du Québec où les activités d'élevage sont intensives et où les surplus de fumier sont importants :

- (1) la région de Chaudière-Appalaches (bassins des rivières Chaudière, Etchemin et Boyer),
- (2) la région de Lanaudière (bassins des rivières L'Assomption et Bayonne),
- (3) la région de la Montérégie pour le bassin de la rivière Yamaska,
- (4) la région du Centre-du-Québec pour le bassin de la rivière Nicolet.

La carte 1 en annexe 2 montre la portion du territoire habité des Basses-Terres du Saint-Laurent qui forme la zone d'étude.

## 1.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'étude globale de caractérisation dans sept bassins versants visait à évaluer les liens qui existent entre la qualité de l'eau de consommation, l'état de la santé des populations et l'intensité des activités agricoles. Les quatre objectifs de l'étude étaient les suivants :

- caractériser la qualité de l'eau, souterraine et de surface, destinée à la consommation domestique dans les bassins versants prédéterminés;
- estimer le niveau d'exposition des populations visées à certains contaminants microbiologiques et chimiques attribuable à la consommation d'eau;

- étudier le lien possible entre la présence de ces contaminants dans l'eau de consommation et les activités agricoles qui ont cours dans les différents bassins ciblés selon une approche scientifique et rigoureuse;
- évaluer les impacts potentiels sur la santé reliés à la contamination de l'eau destinée à la consommation.

Le présent rapport traite de la caractérisation de la qualité de l'eau souterraine dans les sept bassins versants à l'étude en relation avec les activités agricoles présentes (objectifs 1 et 3). D'autres rapports présentent en détail la méthodologie de même que les résultats des différentes études réalisées dans le cadre du projet.

## 2 MÉTHODOLOGIE

Le rapport intitulé *Méthodologie* propose une version détaillée du protocole employé dans cette étude. La présente section porte sur les éléments plus caractéristiques de ce rapport.

### 2.1 DÉFINITION DE ZONE TÉMOIN ET DE ZONE AGRICOLE INTENSIVE

Le but essentiel de l'étude était d'évaluer l'impact des activités agricoles sur la qualité de l'eau souterraine dans certaines régions du Québec où il y a des activités intensives d'élevage. Pour permettre une évaluation objective des impacts, le territoire étudié a été divisé en deux zones : (1) une zone de référence ou zone témoin représentée par des municipalités où l'activité agricole est faible (utilisation de moins de 25 % du territoire) avec un bilan de phosphore  $P_2O_5$  négatif, et (2) une zone agricole intensive définie comme une municipalité où l'activité agricole, culture et élevage intensifs, couvre 25 % ou plus du territoire et où le bilan de phosphore se révèle excédentaire.

Le bilan de phosphore était ainsi l'indicateur retenu pour estimer les quantités de fumier ou de lisier répandues sur les terres agricoles. La quantité de phosphore, provenant des déjections animales, est évaluée d'après le nombre d'unités animales sur le territoire. Une unité animale correspond au nombre d'animaux équivalant à un bovin adulte en ce qui concerne le rejet d'azote.

### 2.2 CHOIX DES BASSINS VERSANTS

Les rivières principales des bassins versants retenus pour cette étude font partie d'une liste de rivières où la qualité des eaux de surface est détériorée, en particulier par les concentrations excessives de phosphore. Leurs bassins versants occupent une partie importante du territoire agricole du Québec (voir carte 1 de l'annexe 2 de localisation) et regroupent la majorité des producteurs agricoles du Québec. La section qui suit présente quelques caractéristiques des bassins choisis.

#### 2.2.1 Bassin de la rivière Bayonne

La rivière Bayonne dans la région administrative de Lanaudière est un des petits bassins (347 km<sup>2</sup>) considérés dans cette étude. Cependant, les activités d'élevage y sont très intensives et le bilan de phosphore est largement excédentaire. Le territoire cultivé est dans la partie nord-ouest des Basses-Terres du Saint-Laurent et se continue dans le Bouclier canadien. Sur une grande partie du territoire, les dépôts meubles sablonneux sont épais et plusieurs puits sont aménagés à faible profondeur.

#### 2.2.2 Bassin de la rivière Boyer

La rivière Boyer est située sur la rive sud du Saint-Laurent à l'est de Lévis et elle coule en direction nord pour se jeter dans le fleuve à la hauteur de la municipalité de Saint-Vallier. D'une superficie totale de 217 km<sup>2</sup>, le bassin versant de cette rivière est occupé à 60 % par l'agriculture et à 40 % par la forêt, ce qui lui confère une vocation nettement agricole. La plus grande partie du territoire repose sur une épaisse couche d'argile marine, ce qui a pour conséquence que la majorité des puits dans ce bassin sont profonds, c'est-à-dire creusés au moins jusqu'au roc.

#### 2.2.3 Bassin de la rivière Chaudière

Située sur la rive sud du Saint-Laurent, la rivière Chaudière prend sa source près des États-Unis, à l'embouchure du lac Mégantic, et se jette dans le fleuve à la hauteur de la municipalité de Saint-Romuald, sur la rive sud de Québec. Son bassin versant, qui couvre une superficie totale de 6 682 km<sup>2</sup>, est divisé en cinq sous-bassins principaux : Chaudière, du Loup, Beaurivage, Saint-Victor et Famine. C'est le bassin le

plus vaste qui a été considéré dans cette étude. Caractérisée par un relief assez plat, la portion plus au nord est fortement agricole. La partie méridionale, quant à elle, présente un paysage escarpé plus forestier où se concentrent les principales zones de villégiature. C'est dans le bassin de la rivière Chaudière que se concentre l'élevage intensif, surtout dans les sous-bassins des rivières Beauvillage et Saint-Victor. Les sols sont généralement minces de sorte qu'une majorité de puits sont creusés dans le roc en profondeur.

#### **2.2.4 Bassin de la rivière Etchemin**

Le bassin de la rivière Etchemin a une superficie totale de 1 466 km<sup>2</sup>. Situé directement au nord-est du bassin de la rivière Chaudière, il présente les mêmes caractéristiques que ce dernier. Les productions animales y sont très développées et contribuent à un excès en phosphore parmi les plus élevés dans les bassins considérés dans cette étude. Localisée au pied des Appalaches, les sols y sont minces et les puits y sont en grande majorité creusés en profondeur dans le roc.

#### **2.2.5 Bassin de la rivière L'Assomption**

Située sur la rive nord du Saint-Laurent, à la pointe nord de l'île de Montréal, la rivière L'Assomption prend sa source dans le massif du mont Tremblant et se jette dans le fleuve à la hauteur de la ville de Repentigny. Son bassin versant, divisé en neuf sous-bassins, couvre une superficie totale de 4 220 km<sup>2</sup>. La forêt occupe les trois quarts de la superficie du bassin et les activités de villégiature sont concentrées dans ce secteur. Plus populeux, le secteur sud est fortement agricole, urbanisé et industrialisé. Les productions animales dominantes dans le bassin de la rivière L'Assomption sont le porc, le bovin laitier et la volaille. À lui seul, le cheptel porcin représente plus de 50 % des unités animales recensées dans le territoire. Le sous-sol dans la région agricole contient une couche épaisse d'argile marine couverte en plusieurs endroits de sols sablonneux plus vulnérables à la contamination.

#### **2.2.6 Bassin de la rivière Nicolet**

La rivière Nicolet, longue de 150 km, est située sur la rive sud du Saint-Laurent et occupe le centre des Basses-Terres. Elle draine un territoire de 3 400 km<sup>2</sup>. Le bassin versant de la rivière Nicolet s'étend jusqu'au pied des Appalaches et il est couvert en grande partie de dépôts meubles perméables dans les parties centrale et sud du bassin alors que le nord repose sur une couche d'argile importante. Plusieurs aquifères importants alimentent des villes comme Victoriaville, Warwick et Kingsey Falls. L'activité agricole dominante dans le bassin de la rivière Nicolet est la production laitière, bien que l'élevage des bovins de boucherie connaisse une nette hausse et que l'élevage des porcs soit en expansion dans certaines municipalités. Le nombre d'unités animales dans ce bassin est plus petit qu'ailleurs et le surplus de phosphore est aussi inférieur à ce qui se mesure dans les autres bassins versants.

#### **2.2.7 Bassin de la rivière Yamaska**

Située sur la rive sud du Saint-Laurent, la rivière Yamaska prend sa source dans le lac Brome et se jette dans le fleuve à la hauteur du lac Saint-Pierre. Son bassin versant, divisé en sept sous-bassins, couvre une superficie totale de 4 784 km<sup>2</sup>. Le territoire est caractérisé par des activités urbaines, industrielles et agricoles intensives. Le secteur sud est favorisé par les activités de villégiature. Le pourcentage des terres en culture dépasse 40 %, ce qui traduit une activité agricole intense. L'élevage de porcs et de bovins laitiers domine les productions animales du bassin, avec respectivement 58 % et 21 % du cheptel recensé.

Le tableau A montre les principales caractéristiques de ces bassins où habite 10 % de la population du Québec.

**Tableau A** Caractéristiques des sept bassins versants

Bassin	Aire km <sup>2</sup>	Population	% cultivé	Unités animales par km <sup>2</sup>	Puits échantillonnés	Puits témoins	Excès P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/ha
Bayonne	347	8 226	40,9	290	20	0	105,6
Boyer	217	4100	60,0	180	27	0	43,6
Chaudière	6 682	173 129	13,3	300	274	89	57,5
Etchemin	1 466	42 250	18,9	200	87	1	71,0
L'Assomption	4 220	155 000	14,3	120	127	77	27,2
Nicolet	3 400	91 321	31,6	100	264	14	13,3
Yamaska	4 784	236 000	43,3	150	461	37	44,8
<b>Total T ou</b>							
<b>Moyenne m</b>	<b>21 100<sup>T</sup></b>	<b>710 026<sup>T</sup></b>	<b>24,5<sup>m</sup></b>	<b>190<sup>m</sup></b>	<b>1 260<sup>T</sup></b>	<b>218<sup>T</sup></b>	<b>51,9<sup>m</sup></b>

Source : MENV, Portraits régionaux de l'eau, 1999

(<sup>T</sup>) signifie que le nombre est le total de la colonne.

(<sup>m</sup>) signifie que le nombre est la moyenne des valeurs de cette colonne.

## 2.3 CHOIX DES PARAMÈTRES ANALYSÉS

En zone agricole, les préoccupations concernant la santé publique se concentrent sur les contaminants de nature chimique (engrais, pesticides) ou microbiologique (protozoaires, bactéries, virus). L'étude avait pour but de couvrir une portion significative de la zone où l'agriculture est une activité importante au Québec. Il a été convenu, en examinant ce qui s'est fait ailleurs au Canada et aux États-Unis, de concentrer les analyses sur quatre paramètres, soit (1) les nitrites-nitrates représentant la contamination de nature chimique, et les microorganismes indicateurs suivants : (2) la bactérie *Escherichia coli*, (3) les bactéries entérocoques, ainsi que (4) les virus de type coliphages F-spécifiques, représentant la contamination microbiologique. Ces indicateurs microbiologiques sont aussi ceux qui sont utilisés pour évaluer la qualité des eaux souterraines non désinfectées et vulnérables selon l'article 13 du *Règlement sur la qualité de l'eau potable*.

### 2.3.1 Nitrites-nitrates

Les sols naturels sont habituellement pauvres en azote et en phosphore de sorte que, pour augmenter la fertilité des sols, ces éléments doivent être ajoutés sous forme d'engrais minéraux, de fumier ou de lisier provenant de l'élevage de bétail. Le phosphore est facilement absorbé par les particules minérales du sol donc il migre peu vers les eaux souterraines. Il demeure toutefois un contaminant fréquent des eaux de surface, puisqu'il risque d'être entraîné par le ruissellement et l'érosion des sols à la fois en solution et associé à des particules de sol.

L'azote est essentiel à la croissance des plantes, et des quantités adéquates de cet élément doivent être fournies selon le type de culture et la période d'épandage. Les engrais minéraux contiennent de l'azote sous forme ammoniacale (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ou sous forme de nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), alors que les fumiers et les lisiers renferment de l'azote lié à la matière organique et sous forme ammoniacale s'oxydant rapidement dans les sols pour former des nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) ou des nitrates. C'est sous cette dernière forme, très mobile, que l'azote se trouve éventuellement en concentrations plus ou moins élevées dans les eaux souterraines et les eaux de surface, notamment lorsqu'une surfertilisation des sols entraîne une concentration excédentaire. À grande profondeur, les eaux souterraines évoluent en milieu réducteur, ce qui affecte les nitrates qui subissent des transformations par des microorganismes anaérobies, par exemple *Pseudomonas*. Ces transformations peuvent aller jusqu'à la dénitrification (Evangélu, 1998).

Les nitrates sont universellement reconnus comme un des contaminants les plus répandus dans les eaux souterraines et la teneur limite acceptée dans l'eau potable au Québec (*Règlement sur la qualité de l'eau potable*) est de 10 mg/L-N (N signifie que la concentration est exprimée en poids d'azote). Dans les conditions naturelles, la teneur en nitrates est souvent inférieure à 1,5 mg/L-N de sorte que l'impact des activités humaines peut s'évaluer en partie d'après la présence de nitrates dans l'eau souterraine. Dans cette étude, nous comparons les valeurs de nitrates entre la zone de référence (zone témoin) et la zone agricole intensive.

### 2.3.2 *Escherichia coli*

*Escherichia coli* est une bactérie qui fait partie de la flore intestinale normale des humains et des animaux à sang chaud. C'est une bactérie non pathogène qui joue un rôle dans la digestion en participant à la synthèse des vitamines. Elle protège également l'organisme contre certains autres microbes pathogènes. Cependant, certaines souches de *E. coli* sont pathogènes, comme *O157:H7* responsable de l'épidémie de Walkerton en Ontario, et peuvent exceptionnellement menacer la santé publique.

*E. coli* est généralement reconnue comme le meilleur indicateur bactérien de contamination d'origine fécale en raison de sa spécificité. Les sources habituelles de *E. coli* sont les excréments des humains et des animaux à sang chaud. En région rurale, lorsqu'il n'y a pas de réseau d'égouts sanitaires, *E. coli* peut être associée aux installations sanitaires plus ou moins adéquates des résidences isolées ou à l'épandage de fumier ou de lisier sur les terres agricoles.

Souvent, ce sont les coliformes fécaux ou totaux qui sont employés dans d'autres études comme indicateurs de contamination fécale. Cependant, le groupe des coliformes « fécaux », aussi appelé « thermotolérants », peut contenir des espèces bactériennes qui ne sont pas d'origine fécale stricte. De même, les coliformes totaux peuvent aussi inclure des bactéries qui ne sont pas réellement de souche fécale humaine ou animale.

Pour ces raisons, *E. coli* a été retenue dans cette étude comme le principal indicateur de risque infectieux d'origine fécale. La présence de *E. coli* dans une eau destinée à la consommation indique que cette eau a été en contact avec des matières fécales et donc qu'il y a risque d'y retrouver également des microorganismes pathogènes.

### 2.3.3 Bactéries entérocoques

Comme l'*E. coli*, la majorité des bactéries entérocoques sont des indicateurs de contamination par des sources fécales humaines ou animales. Ces bactéries persistent plus longtemps dans l'environnement que *E. coli*, ce qui met en évidence des pollutions moins récentes. Elles présentent cependant un inconvénient en tant qu'indicateurs : les entérocoques retrouvés dans l'environnement ne sont pas toujours d'origine fécale, ce qui rend cet indicateur moins spécifique que *E. coli* pour mettre en évidence une contamination d'origine fécale. Leur présence révèle davantage une vulnérabilité de l'eau souterraine aux microorganismes de l'environnement qu'un risque à la santé.

### 2.3.4 Virus de type coliphages F-spécifiques

Les coliphages F-spécifiques sont des virus de très petite taille qui infectent *E. coli* et quelques autres bactéries. Ils ne sont pas pathogènes pour l'humain ni pour les animaux, mais ils se multiplient chez les bactéries de leur intestin et sont libérés dans l'environnement avec les matières fécales. Les virus coliphages F-spécifiques peuvent être considérés comme un complément à *E. coli* et aux entérocoques comme indicateurs de contamination fécale. Ainsi, la détection de coliphages F-spécifiques dans une eau souterraine indique une contamination fécale qui n'est pas nécessairement détectable par les indicateurs bactériens traditionnels.

### 2.3.5 Protocole d'échantillonnage des puits

Un protocole complet d'échantillonnage des puits est compris dans un rapport distinct (*Méthodologie*) qui explique en détail la méthodologie suivie. Pour cette étude, les principaux points de ce protocole sont exposés ci-dessous et un exemple du questionnaire, rempli à chaque résidence visitée, est soumis en annexe.

Le choix initial du nombre de puits tenait compte des objectifs du projet qui sont de caractériser la qualité de l'eau souterraine d'abord dans une zone de référence ou zone témoin qui ne devrait pas être affectée par des activités agricoles, et ensuite dans la zone agricole intensive où l'épandage de lisier ou de fumier peut entraîner un excès de nitrates ou de microorganismes dans l'eau. De plus, pour obtenir une bonne couverture régionale, les points d'échantillonnage devaient être distribués entre les différents bassins versants qui représentent une variété de conditions géologiques, topographiques et hydrologiques. Le tableau B ci-dessous indique le nombre de points d'échantillonnage qui étaient planifiés et le nombre de points effectivement échantillonnés pour chaque zone.

**Tableau B** Nombre et localisation des points d'échantillonnage

Bassins	Points planifiés		Points échantillonnés	
	Zone agricole	Zone témoin	Zone agricole	Zone témoin
Boyer	33	0	27	0
Etchemin	110	4	86	1
Chaudière	233	123	185	89
Nicolet	278	15	250	14
Yamaska	528	63	424	37
L'Assomption	102	144	50	77
Bayonne	36	1	20	0
<b>Total</b>	<b>1 320</b>	<b>350</b>	<b>1 042</b>	<b>218</b>

Initialement, 1 670 échantillons devaient être prélevés dont environ 20 % en zone témoin. Le nombre final est de 1 260 échantillons dans les sept bassins versants et le nombre de témoins représente 17,3 % du total. Le nombre moins élevé d'échantillons s'explique par plusieurs facteurs dont le refus du propriétaire de faire échantillonner son eau, la présence d'un système de traitement de l'eau à l'endroit visité, la connexion à un réseau d'aqueduc ou l'absence de résidents au moment et à l'endroit prévus pour l'échantillonnage.

Pour éviter de biaiser l'étude en choisissant les points d'échantillonnage, il a été décidé dès le départ de faire un choix aléatoire. Puisque la localisation des puits au Québec n'est pas connue de façon systématique, le fichier de départ est une base de données cartographiques qui contient les coordonnées (longitude et latitude) de tous les bâtiments qui peuvent être représentés sur une carte à l'échelle 1 : 20 000. C'est à partir d'un tel fichier que les tirages au sort ont été effectués par ordinateur en respectant les règles énoncées ci-dessus, selon lesquelles la zone témoin et la zone agricole intensive doivent être représentées dans des proportions fixées d'avance selon le tableau B.

Au moment de la visite des points d'échantillonnage sélectionnés, un questionnaire détaillé aidait les échantillonneurs à faire un certain nombre de vérifications pour valider un échantillon. Par exemple, seuls les propriétaires du logement et du puits étaient admissibles pour l'échantillonnage, il ne devait pas y avoir de système de traitement de l'eau autre qu'un adoucisseur ni de connexion à un réseau d'aqueduc. Puis, les autres éléments du questionnaire ont permis de préciser le type de puits, sa profondeur, sa localisation (système GPS<sup>1</sup>), la présence et la localisation de tout système de traitement des eaux usées (fosse septique, champ d'épuration, puisard, etc.), la présence ou l'absence d'activité agricole à proximité

1. Instrument indiquant les coordonnées d'un point à l'aide du système de repérage par satellites.

du puits, la présence ou non de tas de fumier ou d'ouvrage d'entreposage du fumier et leur position par rapport au puits. Enfin, le préposé à l'échantillonnage pouvait ajouter des commentaires concernant le puits et son aménagement (voir la copie du questionnaire à l'annexe 1).

Le prélèvement d'échantillons d'eau s'est fait selon une procédure stricte dont les principaux éléments sont les suivants :

- identifier le lieu d'échantillonnage, numéroter l'échantillon selon une procédure pré-établie et répondre au questionnaire;
- retirer l'aérateur du robinet et laisser couler l'eau pendant cinq minutes;
- se laver les mains ou porter des gants lors de la manipulation des bouteilles et s'assurer que l'échantillon est recueilli dans des conditions d'asepsie;
- ranger immédiatement les bouteilles échantillonnées dans une glacière;
- regrouper chaque soir les échantillons prélevés dans la journée et les expédier au laboratoire pour l'analyse microbiologique dès le lendemain matin.

Toute une série de procédures supplémentaires étaient suivies pour s'assurer de l'intégrité des échantillons et de l'identité de l'échantillonneur comprenant l'information nécessaire au suivi des analyses en laboratoire. Ces détails se retrouvent dans le rapport final sur la méthodologie.

Parmi les paramètres analysés dans cette étude, la présence de *Escherichia coli* dans l'eau de consommation a fait l'objet d'une recommandation stricte de faire bouillir l'eau destinée aux humains en raison du risque à la santé résultant d'une contamination fécale. Le lien entre la présence d'entérocoques ou de coliphages F-spécifiques et l'existence d'une contamination fécale est moins bien documenté dans la littérature mais, dans le cadre de l'étude, la présence de l'un ou l'autre de ces indicateurs entraînait aussi l'émission d'un avis d'ébullition de l'eau.

## 2.4 PÉRIODE D'ÉCHANTILLONNAGE ET CHOIX DES LABORATOIRES

Compte tenu de la période d'échantillonnage, l'étude comportait deux volets. Le premier consistait à évaluer l'état de la contamination de l'eau à un moment précis. Tous les échantillons ont été prélevés au cours du mois de mai 2002. Le choix de cette période est le résultat de plusieurs considérations : hydrologiques, microbiologiques et agricoles. Puisque c'est l'eau souterraine qui est en cause, la principale période durant laquelle se fait l'infiltration des eaux de surface vers les formations aquifères au Québec est tout de suite après la fonte des neiges, au printemps. Les engrais (minéraux, fumier, lisier) épandus en surface précédemment peuvent être entraînés par percolation vers les nappes souterraines. À d'autres périodes de l'année, par exemple en été, même après des pluies abondantes, il n'y a jamais d'infiltration d'eau de pluie jusqu'à la nappe, sauf lors d'événements exceptionnels. Après un épandage de lisier ou de fumier au début de l'été, les bactéries sont plus abondantes en surface, mais leur migration vers les eaux souterraines est très incertaine à cause de la compétition exercée par la flore microbienne normale du sol et des processus de filtration par les particules du sol.

Le second volet de l'étude consistait en des échantillonnages répétés pour les mêmes puits pendant une plus longue période. Ainsi, un nombre important de puits (93) déjà inventoriés en mai ont été échantillonnés mensuellement de juillet à novembre 2002 dans la MRC de Montcalm, située dans le bassin de la rivière L'Assomption. L'objectif de ce deuxième échantillonnage était de vérifier la variation de la qualité de l'eau au cours de l'été et de l'automne. L'analyse de ce suivi mensuel est présentée plus loin dans le rapport.

Les analyses chimiques et microbiologiques effectuées au mois de mai ont été réalisées dans les laboratoires du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), alors que les échantillons provenant de la MRC de Montcalm ont été analysés par le MAPAQ, pour les deux volets de l'étude.

### 3 RÉSULTATS DES ANALYSES

#### 3.1 RÉPARTITION DES ANALYSES PAR ZONES ET TYPES DE PUIITS

Le but principal des analyses effectuées dans le cadre de ce projet était de déterminer s'il y avait une différence significative entre la zone témoin et la zone d'agriculture intensive en matière de qualité des eaux souterraines au moment de l'échantillonnage. Le nombre d'échantillons a été réparti sur toute la superficie des bassins versants pour représenter adéquatement ces deux zones. Le tableau C montre la répartition des analyses par types de puits dans les deux zones. L'élément d'interprétation qui est rapidement devenu essentiel pour comprendre les résultats est le type de puits ou d'ouvrage de captage pour l'approvisionnement en eau potable des résidences. Selon le protocole adopté, on distingue 1) les *puits profonds*, dont la profondeur minimale est de huit mètres, 2) les *puits de surface*, de profondeur inférieure à huit mètres, et 3) les *captages* de sources naturelles pouvant être à la limite assimilés aussi à des puits de surface. Pour certains des puits échantillonnés, il n'a pas été possible de confirmer la nature ni même le positionnement du puits, souvent parce que les propriétaires avaient acheté leur maison il y a longtemps et ne possédaient pas cette information.

Au total, les puits de surface représentent près du quart de tous les puits analysés et les puits profonds, plus des deux tiers. Dans la zone témoin, la proportion de puits de surface est de 41 % alors que, dans la zone d'agriculture intensive, elle est de 21 %. Les puits profonds sont généralement capables de soutenir un débit important toute l'année, ce qui n'est pas toujours le cas pour les puits de surface. Dans plusieurs des bassins versants examinés, les puits de surface étaient souvent associés à des résidences temporaires dans des lieux de villégiature.

**Tableau C Répartition des analyses par zones et types de puits**

Système d'approvisionnement en eau	Zone témoin Bilan P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> négatif		Zone d'agriculture intensive Bilan P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Positif		Nombre total	Pourcentage
	#	%	#	%		
Puits de surface	90	41	219	21	309	24,5
Puits profond	119	55	744	72	863	68,5
Captage de source	5	2	23	2	28	2,2
Non précisé	4	2	56	5	60	4,8
<b>Total</b>	<b>218</b>	<b>100</b>	<b>1 042</b>	<b>100</b>	<b>1 260</b>	<b>100</b>

Dans cette partie de l'étude, on ne considère pas le bassin versant d'où provient l'échantillon. Il s'agit de comparer les résultats entre la zone témoin et la zone d'agriculture intensive, ainsi qu'entre les différents types de puits indifféremment de leur localisation.

#### 3.2 ANALYSE DES NITRITES-NITRATES

Pour effectuer l'analyse des nitrates, une distinction est faite entre les puits de la zone témoin (tableau D) et ceux de la zone d'agriculture intensive (tableau E). Les résultats d'analyse sont exprimés sous forme d'une concentration d'azote en mg/L-N. Les tableaux séparent les résultats en plusieurs catégories : une concentration plus grande que 10 mg/L-N correspond à un dépassement de la norme québécoise pour la teneur en nitrates dans les eaux de consommation. À partir de 3 mg/L-N, on convient généralement que la

concentration en nitrates est attribuable à l'activité humaine. De 1,5 à 3 mg/L-N, l'activité humaine est soupçonnée de fournir des nitrates à l'eau souterraine, mais d'autres sources peuvent aussi exister. Les concentrations inférieures à 1,5 mg/L-N sont considérées dans ce rapport comme la teneur de fond.

Les analyses de nitrates sont aussi représentées symboliquement sur une série de cartes en annexe 2 qui utilisent les catégories de concentrations définies ci-dessus. Les cartes 2 à 6 montrent les points d'échantillonnage pour les nitrates sur l'ensemble des bassins (carte 2) et ensuite pour chaque région de la manière suivante : la carte 3 représente les nitrates dans le Centre-du-Québec, bassin de la rivière Nicolet; la carte 4, la région de Chaudière-Appalaches avec les rivières Chaudière, Etchemin et Boyer; la carte 5, la région de Lanaudière avec les rivières L'Assomption et Bayonne et enfin la carte 6, la région de la Montérégie avec le bassin de la rivière Yamaska.

Les cartes synthèses en annexe 2 permettent de visualiser rapidement plusieurs informations. Ainsi, chaque point d'échantillonnage est identifié, de même que la zone d'où il provient, soit une zone agricole ou une zone témoin.

**Tableau D Distribution des concentrations de nitrates—Zone témoin**

Nitrates-nitrites Concentration en mg/L-N	Nombre total #	%	Puits profond		Puits de surface		Captage de source		Non classé	
			#	%	#	%	#	%	#	%
			218	100	119	54,6	90	41,3	5	2,3
Plus de 10	3	1,4	0	0,0	3	3,3	0	0,0	0	0,0
5 et +	6	2,8	1	0,8	5	5,6	0	0,0	0	0,0
3 et +	10	4,6	2	1,7	8	8,9	0	0,0	0	0,0
1,5 et +	38	17,4	14	11,8	23	25,6	1	20,0	0	0,0
Moins de 1,5	180	82,6	105	88,2	67	74,4	4	80,0	4	100

Dans la zone témoin indiquée dans le tableau D, trois puits (1,4 %), tous des puits de surface, montrent une concentration excédant la norme. Moins de 5 % des puits montrent une concentration égale ou supérieure à 3 mg/L-N et ce sont surtout des puits de surface (huit puits sur 10) qui sont affectés. La très grande majorité des points échantillonnés (82,6 %) ont des teneurs en nitrates inférieures à la valeur de 1,5 mg/L-N, considérée comme la teneur de fond. On remarque aussi que, pour les puits profonds, seulement un peu plus de 10 % ont une teneur en nitrates plus grande que 1,5 mg/L-N et qu'aucun des 119 puits témoins profonds n'est contaminé au-delà de la norme de 10 mg/L-N.

Dans la zone d'agriculture intensive (tableau E), près de 3 % des puits (30 au total) affichent une concentration en nitrates excédant la norme de 10 mg/L-N. Trois fois plus de puits profonds que de puits de surface ont été échantillonnés dans cette zone mais, en pourcentage, ce sont encore les puits de surface qui sont les plus affectés dans une proportion de 5 % par rapport à 2,2 % pour les puits profonds. La différence marquante entre les deux zones, agricole et témoin, est le pourcentage de puits avec une concentration en nitrates égale ou supérieure à 3 mg/L-N; cette valeur atteint 12,2 % en zone agricole intensive, alors que dans la zone témoin cette proportion est inférieure à 5 %. Les puits de surface sont plus souvent affectés par des concentrations élevées de nitrates et on remarque que plus du quart des puits de surface ont des concentrations de 3 mg/L-N ou plus alors que moins de 10 % des puits profonds excèdent ce seuil. Le traitement statistique présenté au chapitre 4 analyse ces résultats en intégrant l'ensemble des variables importantes.

**Tableau E Distribution des concentrations de nitrates—Zone d'agriculture intensive**

Nitrates-nitrites Concentration en mg/L-N	Nombre total #	%	Puits profond		Puits de surface		Captage de source		Non classé	
			#	%	#	%	#	%	#	%
			1 042	100	744	71,4	219	21,0	23	2,2
Plus de 10	30	2,9	16	2,2	11	5,0	2	8,7	1	1,8
5 et +	89	8,1	48	6,5	35	16,0	3	13,0	3	5,4
3 et +	133	12,2	68	9,1	57	26,0	4	17,4	4	7,1
1,5 et +	215	20,6	105	14,1	91	41,6	10	43,5	9	16,1
Moins de 1,5	827	79,4	639	85,9	128	58,4	13	56,5	47	83,9

L'examen visuel des cartes en annexe 2 (cartes 2 à 6) indique que la distribution des puits avec des valeurs plus élevées n'est pas concentrée dans des endroits bien déterminés et que leur dispersion sur l'ensemble du bassin ne montre pas clairement de corrélation avec le niveau d'activité agricole ou de surplus en fumier. Deux points ayant des concentrations plus élevées sont rarement voisins, ce qui indique que ce n'est pas une grande partie d'une formation aquifère qui est affectée, mais plutôt que la contamination a probablement une source locale.

### 3.3 ANALYSE DE LA CONTAMINATION BACTÉRIENNE

Dans la zone témoin (tableau F), 218 puits ont été échantillonnés pour les analyses microbiologiques. Rappelons que toutes ces analyses ont été effectuées en mai 2002, période de l'année où la recharge annuelle des nappes souterraines est considérée comme maximale. Un suivi effectué de juillet à novembre sur un petit nombre de puits situés dans la MRC de Montcalm, ciblés pour maximiser la manifestation de la variation saisonnière, replace les résultats dans leur contexte.

Pour l'ensemble des données dans la zone témoin, quatre échantillons ont montré la présence de *E. coli*, soit 1,8 % des endroits visités, dont trois puits de surface et un puits profond. La présence d'entérocoques a été détectée 12 fois, soit dans 5,5 % des puits échantillonnés, encore de façon prédominante dans les puits de surface (deux fois plus que dans les puits profonds). Les virus coliphages étaient présents dans un seul puits, ce qui ne permet pas de conclure sur la signification de ce paramètre. L'examen des cartes de distribution de microorganismes (cartes 7 à 11 en annexe 2) montre que tous ces points contaminés sont dispersés sur tout le territoire sans relation d'un point à un autre.

**Tableau F Présence de *E. coli*, d'entérocoques ou de coliphages --- Zone témoin**

	Nombre	%	Puits profond		Puits de surface		Captage de source		Non classé	
			#	%	#	%	#	%	#	%
Analyses de <i>E. coli</i>	218	100	120	55,0	89	40,8	5	2,3	4	1,8
Dépassements de <i>E. coli</i>	4	1,8	1	0,8	3	3,4	0	0,0	0	0,0
Analyses d'entérocoques	218	100	120	55,0	89	40,8	5	2,3	4	1,8
Dépassements d'entérocoques	12	5,5	4	3,3	8	9,0	0	0,0	0	0,0
Analyses de coliphages	217	100	119	54,8	89	41,0	5	2,3	4	1,8
Dépassements de coliphages	1	0,5	1	0,8	0	0,0	0	0,0	0	0,0

L'analyse des données dans la zone d'agriculture intensive est donnée au tableau G. Un plus grand nombre de puits ont été échantillonnés dans la zone cible pour vérifier s'il y avait une tendance quelconque. En fait, les résultats montrent des proportions de puits contaminés similaires à celles de la zone témoin.

**Tableau G Présence de *E. coli*, d'entérocoques ou de coliphages --- Zone agricole intensive**

	Nombre	%	Puits profond		Puits de surface		Captage de source		Non classé	
			#	%	#	%	#	%	#	%
Analyses de <i>E. coli</i>	1 042	100	743	71,3	220	21,1	23	2,2	56	5,4
Dépassements de <i>E. coli</i>	16	1,5	9	1,2	5	2,3	1	4,4	1	1,8
Analyses d'entérocoques	1 040	100	741	71,2	220	21,2	23	2,2	56	5,4
Dépassements d'entérocoques	60	5,8	30	4,0	22	10,0	5	21,7	3	5,4
Analyses de coliphages	1 042	100	743	71,3	220	21,1	23	2,2	56	5,4
Dépassements de coliphages	2	0,2	2	0,3	0	0,0	0	0,0%	0	0,0

Le nombre (16) et le pourcentage de puits contaminés par *E. coli* dans la zone d'agriculture intensive (1,5 %) est comparable à ce qui est observé dans la zone témoin (quatre cas ou 1,8 %). Nous verrons plus loin comment la variation saisonnière des cas de contamination se compare à ce constat. Ces résultats sont comparables à ceux de Borhardt *et al.* (2003) qui ont détecté *E. coli* dans un seul échantillon sur 193 lors d'une étude sur une cinquantaine de puits individuels du Wisconsin. Cependant, d'autres études publiées ailleurs en Amérique du Nord obtenaient des taux de contamination plus élevés.

Le nombre et le pourcentage de puits contaminés par des entérocoques et des virus coliphages est un calque presque parfait des résultats observés dans la zone témoin. Le traitement statistique de ces résultats est présenté au chapitre 4.

Comme dans le cas des nitrates, les installations de captage qui sont affectées par des contaminations microbiologiques sont surtout des ouvrages de surface : puits peu profonds et captages de sources. Les cartes en annexe 2 montrent aussi que les points contaminés sont indépendants les uns des autres et qu'ils sont séparés de plusieurs kilomètres. Toutes ces informations pointent aussi vers des sources très locales de contamination bactériologique qu'on ne peut pas rattacher de manière convaincante à l'activité agricole qui se déroule à proximité.

### 3.4 CONTAMINATION SIMULTANÉE PAR LES NITRATES ET LES BACTÉRIES

La fréquence de l'occurrence de contamination simultanée, c'est-à-dire la contamination d'un même puits par les nitrates et par au moins une bactérie, a été examinée pour les 1 260 puits échantillonnés dans cette étude. L'hypothèse était que, les nitrates et les bactéries étant liés à l'activité d'épandage, on peut s'attendre à trouver ces deux contaminants ensemble dans l'eau souterraine affectée par les activités agricoles (épandage).

Lorsque le critère de contamination était une concentration en nitrates à un niveau  $\geq 10$  mg/L-N et la présence d'au moins une bactérie, seuls trois cas sur l'ensemble des puits analysés, soit 0,24 %, présentaient une contamination simultanée. Tous ces puits étaient situés dans le bassin de la Yamaska et deux de ces trois cas étaient des puits profonds, type duquel on s'attend à ce que la contamination soit moins grande.

Suivant le critère d'une concentration en nitrates à un niveau  $\geq 3$  mg/L-N et la présence d'au moins une bactérie, il y avait une contamination simultanée dans 18 puits, soit 1,4 % des puits analysés. Cette fois encore, les puits qui correspondaient à ce critère représentent autant de puits profonds que de puits de surface. Devant l'ambiguïté qui découle de cette analyse et la rareté des contaminations simultanées, il est peu probable que la contamination observée soit attribuable à l'activité agricole seulement. Au moins une autre hypothèse mérite d'être mentionnée, celle de l'aménagement défectueux des puits.

### 3.5 SUIVI SAISONNIER DE LA QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE

Les données de la campagne de mai 2002 ont été complétées par une série d'analyses effectuées entre juillet et novembre 2002 sur un nombre plus limité de points de mesure dans la MRC de Montcalm, située dans le bassin versant de la rivière L'Assomption. Quarante-trois puits font partie de la liste des points échantillonnés à plusieurs reprises. Chaque suivi comporte normalement six analyses (la première en mai et cinq autres prélèvements consécutifs à partir de juillet). Toutefois, quelques puits n'ont été échantillonnés que quatre ou cinq fois en raison de problèmes logistiques comme l'absence des propriétaires, la vente de la propriété, etc. Ces puits représentent un sous-ensemble tiré d'une campagne d'échantillonnage intensive réalisée dans la MRC de Montcalm, dans le cadre du présent projet, pour vérifier si l'impact des activités agricoles peut être anticipé en considérant l'indice de vulnérabilité des aquifères.

Pour la réalisation du suivi saisonnier, les mêmes protocoles d'échantillonnage que ceux de l'étude de caractérisation des sept bassins versants ont été suivis. Le tableau H résume la répartition des puits échantillonnés selon le type d'installation de captage et la zone, témoin ou agricole intensive, définie précédemment.

On voit dans ce tableau que la répartition des points échantillonnés par types de puits est très différente de ce qui s'est fait pour la caractérisation des sept bassins versants, surtout en ce qui a trait à la zone témoin qui, pour le suivi mensuel, est représentée uniquement par des puits de surface.

Ce groupe de puits représente un échantillon **volontairement très biaisé** de l'ensemble des puits puisqu'ils ont été sélectionnés parmi les plus susceptibles à la contamination afin que les variations saisonnières y soient bien apparentes.

**Tableau H Répartition des puits échantillonnés pour le suivi mensuel**

Zone	Puits profonds		Puits de surface		Captage de source		Non classé		Total
	#	%	#	%	#	%	#	%	
Zone d'agriculture intensive	26	44	19	32	2	3	12	20	59
Zone témoin	0	0	33	97	0	0	1	3	34
<b>Total</b>	<b>26</b>		<b>52</b>		<b>2</b>		<b>13</b>		<b>93</b>

#### 3.5.1 Analyses chimiques : nitrites-nitrates

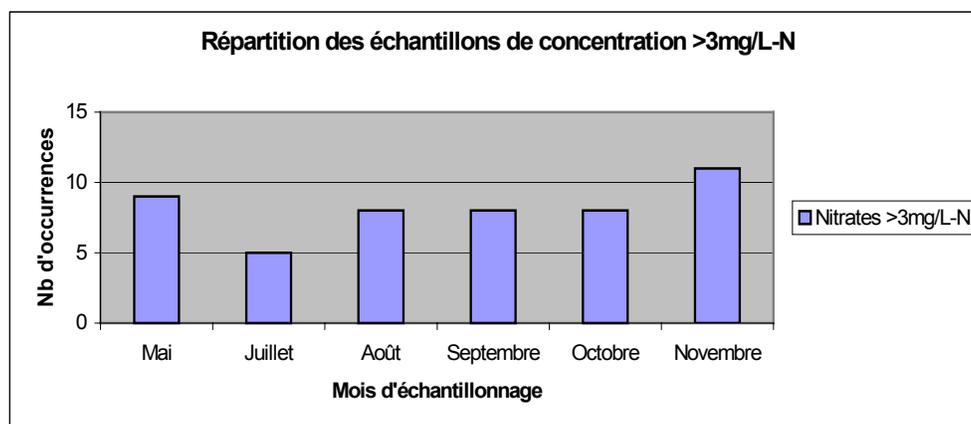
Le suivi des nitrates montre que les valeurs observées à chacun des puits sont relativement constantes, peu importe le mois où s'est fait le prélèvement d'échantillons d'eau. Puisque les puits domestiques prélèvent des volumes très modestes (1 à 2 m<sup>3</sup>/jour) d'eau souterraine, on ne s'attend pas à des variations importantes des caractéristiques chimiques de l'eau dont la provenance est tout près du point de captage.

Les concentrations mesurées dans les puits des différentes zones sont illustrées dans le tableau I. Quatre puits ont une concentration en excès de la norme de potabilité de 10 mg/L-N et tous sont dans la zone agricole intensive.

**Tableau I Nitrates—Suivi mensuel de la zone agricole intensive et de la zone témoin**

Nitrites-nitrates Concentration en mg/L-N	Nombre total #	%	Zone agricole intensive		Zone témoin	
			#	%	#	%
			93	100	59	63,4
Plus de 10	4	4,3	4	6,8	0	0
5 et +	9	9,7	8	13,5	1	2,9
3 et +	14	15,1	10	16,9	4	11,8
1,5 et +	29	31,2	15	25,4	14	41,2
Moins de 1,5	64	68,8	44	74,6	20	58,8

**Figure 1 Variation mensuelle de la concentration en nitrates**



Quinze pour cent des puits présentent des concentrations égales ou supérieures au seuil de 3 mg/L-N, niveau que nous avons utilisé pour déterminer un impact significatif de l'activité humaine sur la qualité des eaux souterraines. Ces proportions sont comparables à ce qui a été observé dans les autres bassins versants. Ce qu'on retient de cette analyse, c'est que la qualité chimique de l'eau, du moins en ce qui concerne les nitrates, est relativement constante au cours de la période d'échantillonnage, comme l'illustre la figure 1.

Des 29 puits dont la concentration en nitrates est de 1,5 mg/L-N et plus, quatre sur cinq sont des puits de surface. Il semble donc que la contamination par les nitrates soit beaucoup plus importante pour les puits de faible profondeur à cause de la proximité de la source de nitrates et aussi à cause de l'aménagement souvent moins sécuritaire des puits de surface. Les puits avec une teneur en nitrates supérieure à 1,5 mg/L-N se distribuent à peu près également dans la zone d'agriculture intensive (15) et dans la zone témoin (14).

La section suivante expose les résultats du suivi des analyses microbiologiques.

### 3.5.2 Analyses microbiologiques

Le suivi mensuel de la qualité microbiologique des eaux souterraines des 93 puits s'articule autour d'un grand nombre d'analyses, 533 au total. Dans le tableau J, les résultats sont classés en fonction du nombre d'événements de contamination, un *événement* correspondant à la présence d'au moins un des trois indicateurs analysés (*E. coli*, entérocoques ou virus coliphages) lors d'une analyse mensuelle. Le *nombre de puits affectés au moins une fois* correspond, pour un puits quelconque, à une analyse positive pour un des trois indicateurs mentionnés ci-dessus, peu importe le mois au cours duquel a été fait le prélèvement.

Il faut noter dans ce tableau que la présence de *E. coli* est presque toujours accompagnée d'entérocoques, mais que l'inverse n'est pas vrai. Des 43 puits qui ont été affectés par un indicateur de contamination, 84 % sont des puits de surface. Les deux puits dans lesquels les virus coliphages ont été détectés n'ont subi aucune autre contamination au cours de l'échantillonnage.

Une question importante abordée dans ce volet est le fait de vérifier si la présence d'une contamination microbiologique est plus importante à certaines périodes de l'année. L'analyse de la variabilité temporelle met en perspective les études de caractérisation effectuées en mai pour les sept bassins versants et pour la MRC de Montcalm. Le tableau K illustre les données d'analyses en fonction du temps. Chaque événement représente ici la présence d'au moins un indicateur dans une analyse mensuelle. La figure 2 illustre de manière graphique cette variation saisonnière.

Le tableau et la figure montrent que la contamination microbiologique est plus fréquente en été avec un maximum d'activité au mois d'août. Ce déroulement se répète aussi bien en zone d'agriculture intensive qu'en zone témoin.

**Tableau J Suivi mensuel des analyses microbiologiques – Nombre d'événements**

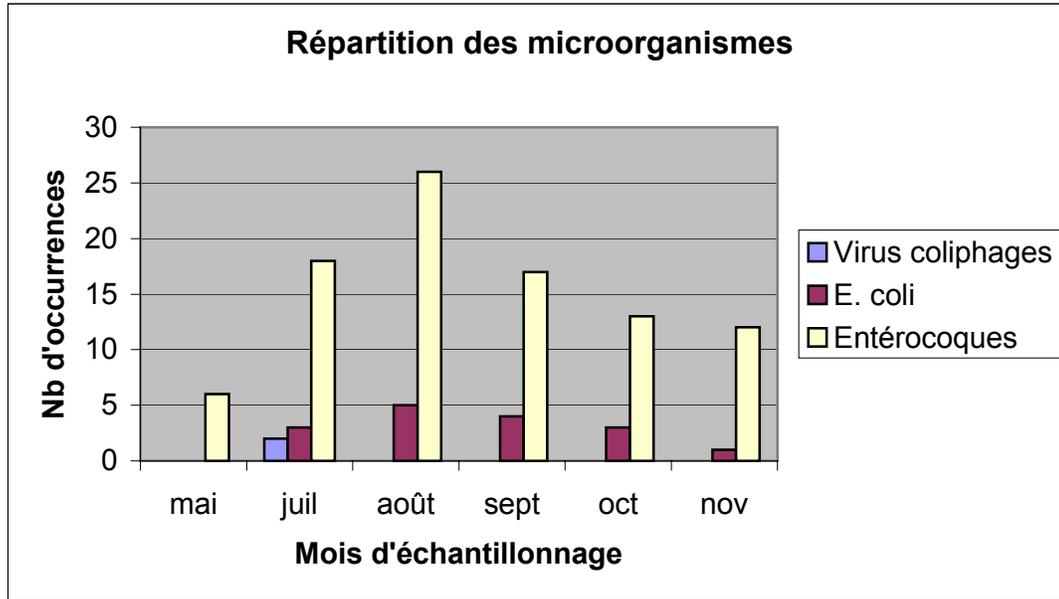
	Nombre	Zone agricole intensive	Zone témoin
Nombre d'événements	95	48	47
Présence de <i>E. coli</i>	16	9	7
Présence d'entérocoques	92	45	47
Présence de coliphages	2	2	0
Nombre de puits affectés au moins une fois	43	21	22
Nombre de puits affectés plus d'une fois	29	14	15

**Tableau K Suivi mensuel des analyses microbiologiques – Répartition mensuelle**

	Nombre	Zone agricole intensive	Zone témoin
Total	95	48	47
Mai	6	5	1
Juillet	20	9	11
Août	26	14	12
Septembre	18	7	11
Octobre	13	7	6
Novembre	12	6	6

Le protocole initial avait établi que la période propice pour l'échantillonnage de l'eau souterraine se situait en mai parce que c'est le moment de l'année où il y a le plus d'infiltration à la suite de la fonte de la neige. Cependant, concernant la contamination microbiologique, les résultats indiquent que la proportion de puits contaminés était à son plus haut au mois d'août (figure 2). Il faut toutefois retenir que la majorité des puits ayant fait l'objet d'un suivi dans le temps sont des puits de surface ou des captages de sources qui sont plus vulnérables à la contamination. De plus, la majorité de ces puits de surface se trouvent en zone témoin (tableau H ci-dessus), ce qui rend difficile l'interprétation selon laquelle la contamination serait d'origine agricole.

**Figure 2** Variation mensuelle de la contamination par des microorganismes



*Note : Certains puits sont contaminés par plus d'un indicateur à la fois.*

Ce type de suivi devrait faire l'objet d'études particulières afin de déterminer avec plus de confiance les activités de la saison estivale pouvant être responsables de la contamination bactériologique des eaux souterraines. Selon les données de nitrates, il ne semble pas que l'eau se soit détériorée de façon significative au cours de cette période.

Au cours de l'été et de l'automne 2002, les prélèvements et les analyses microbiologiques étaient sous la responsabilité du MAPAQ. Dans le protocole d'intervention convenu pour cette partie de l'étude, les responsables de l'échantillonnage devaient communiquer aux propriétaires des résidences les résultats d'analyses bactériologiques positives (c'est-à-dire la contamination de l'eau par au moins un des paramètres définis plus haut). Cette information était accompagnée d'une recommandation de désinfecter leur puits. Des 43 puits qui ont été contaminés au moins une fois, 21 ont été désinfectés une fois. Quant à ceux qui présentent plus d'un événement de contamination, 13 de ceux qui avaient été désinfectés (près de la moitié dans la zone témoin) ont subi une contamination subséquente. Dans ces cas, il faudrait revoir tout l'aménagement du puits et des environs parce qu'une source constante de contamination se trouve à proximité.

De cette étude de suivi mensuel, le facteur qui ressort le plus clairement est le type de construction de puits, les puits de surface étant beaucoup plus susceptibles d'être contaminés, que la source de contamination soit d'origine agricole ou non. Par ailleurs, il est important de noter la variation importante de la contamination microbiologique qui était à son maximum en août et à son minimum en mai.

## 4 ANALYSE STATISTIQUE

### 4.1 PONDÉRATION DES ÉCHANTILLONS

Pour ce qui est de l'étude de caractérisation des sept bassins versants, l'analyse statistique des résultats a été confiée à une équipe d'experts de l'Institut de la Statistique du Québec (ISQ). Le rapport complet de l'ISQ est présenté à l'annexe 3. La première étape du travail a consisté à pondérer l'échantillon de puits utilisés pour cette étude. Selon le protocole initial, chaque point d'échantillonnage a été choisi à partir d'un fichier électronique contenant les coordonnées de longitude et de latitude de chaque bâtiment représentable sur une carte géographique à l'échelle 1:20 000. Cette procédure apparemment non biaisée favorisait en fait les puits qui sont rattachés à une exploitation agricole parce que, pour un puits d'alimentation en eau, on peut trouver à proximité plusieurs bâtiments comme des granges, des remises, des étables ou des écuries qui ne sont pas des habitations. Pour corriger cet effet, un facteur de pondération a pris en compte le nombre de bâtiments à proximité de chaque puits échantillonné.

Un autre aspect de la pondération était le problème des substituts. Selon le protocole, lorsque l'échantillonneur se présentait à un lieu de prélèvement choisi au hasard et qu'une circonstance (refus de participer à l'étude, absence, locataire, etc.) empêchait la prise de l'échantillon, il pouvait alors visiter jusqu'à trois des voisins les plus proches pour obtenir un échantillon. Plusieurs causes de refus sont mentionnées au protocole que devaient suivre les échantillonneurs. La pondération a alors tenu compte du remplacement lié à l'inadmissibilité d'un puits. Par exemple, pour un puits avec présence d'un système de traitement de l'eau, l'échantillonneur tentait d'obtenir un puits de remplacement dans le voisinage. Ainsi, les puits situés dans des zones où il y a davantage de puits inadmissibles à l'étude ont plus de chance d'être sélectionnés pour échantillonnage. Les poids ont été ajustés pour tenir compte de cela.

### 4.2 MODÈLE DE RÉGRESSION LOGISTIQUE

L'objectif de l'étude statistique était l'évaluation de la qualité de l'eau souterraine selon deux mesures, les nitrates et les indicateurs de contamination microbiologique. Le modèle statistique de régression logistique a été utilisé dans cette étude. Il permet d'analyser des données de type vrai ou faux, des données qui se traitent de façon dichotomique (réponse par *oui* ou *non*), comme dans le cas présent où des bactéries sont présentes ou non dans un échantillon d'eau. Pour les variables distribuées en continu comme les nitrates, on traite l'information à partir de valeurs seuils qui sont dépassées ou non dans un échantillon donné. Ce type de modèle fait ainsi intervenir de nombreux paramètres qui ont un effet significatif (ou non) sur la qualité d'un échantillon donné.

Ce modèle était particulièrement approprié à l'étude de caractérisation puisque les réponses du questionnaire ont permis aux statisticiens de considérer huit variables pouvant expliquer la teneur en nitrates ou la présence de bactéries observée dans un puits donné. Ces variables explicatives sont les suivantes :

- 1) la zone (témoin ou agricole). Un modèle statistique utilise la strate et un autre modèle utilise la zone;
- 2) la strate d'échantillonnage (un des sept bassins versants ou une strate correspondant à tous les échantillons témoins). Un modèle statistique utilise la strate et un autre modèle utilise la zone;
- 3) le type de puits;
- 4) l'absence ou la présence d'activité agricole à proximité du puits;
- 5) le type d'installation septique;
- 6) la distance entre le puits et l'installation septique;
- 7) le type d'entreposage de fumier;
- 8) la distance entre le puits et l'entreposage de fumier.

Essentiellement, le modèle de régression logistique permet de modéliser une probabilité  $p_i$  (valeur comprise entre 0 et 1) que la valeur de nitrates, par exemple, soit plus grande qu'une valeur seuil étant donné les valeurs prises par d'autres variables qui affectent ce puits. De la même façon, on peut établir la probabilité que la présence de bactéries soit associée à des variables explicatives. Dans toutes les interprétations résumées ci-dessous, on ne retiendra que celles qui sont jugées *statistiquement significatives* (à un seuil de 0,05). Toutes les variables explicatives énumérées ci-dessus ont été utilisées pour tenter d'expliquer les résultats mais, pour la plupart, il n'a pas été possible de confirmer, statistiquement, qu'il y avait association entre ces variables. Cela ne veut pas dire qu'il y a ou qu'il n'y a pas de relations, mais que, selon la taille ou la structure de l'échantillon de puits, il n'est pas possible de conclure autrement.

### 4.3 ANALYSE STATISTIQUE DE LA CONCENTRATION DE NITRATES

Pour analyser des nitrates, le modèle de régression logistique se base sur la présence d'une concentration en nitrates égale ou supérieure à 3 mg/L-N. Cette valeur seuil correspond à une concentration de nitrates que l'on considère comme influencée par une activité humaine dans une région. Elle témoigne d'un début de contamination, même si le critère de la santé (10 mg/L-N) n'est pas dépassé. Pour analyser cette partie, les statisticiens tiennent compte des huit variables explicatives qui pourraient expliquer la teneur en nitrates observée dans un puits donné.

L'analyse subséquente a permis d'éliminer un bon nombre de variables explicatives, soit à cause de la proportion élevée de valeurs manquantes (variables 7 et 8) ou parce qu'elles ne présentent pas de relation significative avec la variable dépendante. Les trois premières (zone, strate et type de puits) sont celles qui ont permis de mieux expliquer les résultats obtenus pour les nitrates. Les tableaux L et M illustrent la probabilité prédite selon le modèle de régression logistique de trouver une concentration en nitrates plus grande ou égale à 3 mg/L-N selon la zone et le type de puits (tableau L) et selon la strate ou le bassin versant (tableau M).

**Tableau L Probabilité de trouver un puits dont la concentration en nitrates égale ou excède le seuil de 3 mg/L-N selon la zone et le type de puits**

Zone	Type de puits		
	Profond	Surface	Captage
Agriculture intensive	0,09	0,25	0,17
Témoin	0,02	0,07	0,05

Dans le tableau L, on voit que la probabilité d'observer un puits avec une concentration en nitrates d'au moins 3 mg/L-N est significativement plus grande en zone d'agriculture intensive qu'en zone témoin, peu importe le type de puits. On remarque aussi que les puits de surface sont plus susceptibles d'être affectés par des nitrates que les puits profonds dans la même zone et les captages.

**Tableau M Probabilité prédite de trouver un puits dont la concentration en nitrates égale ou excède le seuil de 3 mg/L-N selon le bassin versant et le type de puits**

Bassin versant	Type de puits		
	Profond	En surface	Captage
Nicolet (agriculture intensive)	0,09	0,27	0,15
Yamaska (agriculture intensive)	0,07	0,22	0,11
L'Assomption (agriculture intensive)	0,04 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	--
Bayonne (agriculture intensive)	0,19	0,46	--
Boyer (agriculture intensive)	0,24	0,54	--
Etchemin (agriculture intensive)	0,13	0,36	0,21
Chaudière (agriculture intensive)	0,10	0,30	0,17
Zone témoin	0,02	0,07	0,04

Note : Lorsque la cellule contient « -- », c'est que la probabilité n'a pu être estimée faute de données disponibles. « ns » signifie que ces valeurs ne sont pas significatives au seuil de 0,05.

En comparant la probabilité que l'eau d'un puits ait une concentration de nitrates égale ou supérieure à 3 mg/L-N selon le bassin versant et le type de puits (tableau M), on observe des variations régionales qui sont importantes. Malgré ces variations, les différences entre la zone en surplus et la zone témoin sont significatives pour tous les bassins versants, à l'exception du bassin de L'Assomption.

Aussi, il est clair que la zone témoin est beaucoup moins affectée par les nitrates (probabilités de 2 à 7 % d'excéder la valeur seuil de 3 mg/L-N) que les zones d'activité agricole intensive des différents bassins, les probabilités y sont beaucoup plus élevées. Les puits de surface sont partout plus susceptibles à la contamination par les nitrates avec des probabilités très grandes (14 à 54 % de dépasser le seuil de 3 mg/L-N), et ce, pour chacun des bassins versants.

Ce qui ressort de ces analyses, c'est que les zones d'activité agricole intense ont une probabilité plus grande d'être affectées par les nitrates, sauf le bassin de L'Assomption, et que les puits de surface (et les captages de sources) sont beaucoup plus affectés que les puits profonds.

Cette étude est une représentation instantanée des conditions observées en mai 2002, et il serait opportun d'effectuer un suivi sur plusieurs années d'un certain nombre de puits pour vérifier si, à moyen terme, il y a dégradation de la qualité de l'eau souterraine en zone agricole.

#### 4.4 ANALYSE STATISTIQUE DE LA CONTAMINATION PAR DES BACTÉRIES

Comme dans le cas des nitrates, le modèle de régression logistique étudie la présence ou l'absence de bactéries dans l'eau du puits échantillonnée et non pas leur nombre. La variable réponse prend deux modalités :

- a) il y a au moins une bactérie présente (*E. coli* ou entérocoque);
- b) il n'y a aucune bactérie (ni *E. coli*, ni entérocoque).

Pour cette partie de l'analyse, on a considéré les mêmes huit variables explicatives que dans le cas des nitrates. Leur analyse s'est avérée plus difficile parce que le nombre total de cas de contamination bactérienne est petit (6,7 % des échantillons analysés) et, pour plusieurs variables, trop de valeurs sont manquantes (par exemple, les distances qui séparent l'entreposage du fumier et le puits).

Les résultats de l'analyse n'ont pas permis de dégager des conclusions aussi nettes que dans le cas des nitrates. Contrairement à nos attentes, la variable « zone », c'est-à-dire la zone témoin comparée à la zone d'activité agricole intense ou zone de surplus en phosphore, n'est pas liée à la probabilité de détecter la présence de bactéries indicatrices. De la même façon, la strate, c'est-à-dire le bassin versant dans lequel le puits a été échantillonné, n'est pas non plus une variable déterminante pouvant prédire la probabilité de contamination.

Ce qui ressort de l'application du modèle, c'est que surtout deux variables expliquent les résultats : le type de puits, comme c'était le cas pour les nitrates, et le type d'aménagement pour l'entreposage du fumier. Le lien entre cette dernière variable et la présence de microorganismes dans l'eau souterraine mène directement à la recommandation de réaliser de plus amples études pour déterminer dans quelles mesures les sites d'entreposage de fumier (même avec les nouvelles structures) affectent la qualité de l'eau souterraine.

Le tableau N indique clairement que le type d'entreposage du fumier est de conséquence, mais que la zone (témoin ou agricole intense) n'explique rien. Comme dans le cas des nitrates, c'est souvent le type de puits qui est la clé pour prédire adéquatement le risque de contamination, les puits de surface étant de deux à trois fois plus affectés que les puits profonds.

Avec le modèle de régression logistique, il n'a pas été possible de détecter un lien significatif entre la présence de bactéries dans l'eau d'un puits et la variable de strate (bassin hydrographique), après avoir enlevé l'effet du type de puits et du type d'entreposage du fumier. Puisque la proportion de puits avec présence de bactéries est faible, une plus grande taille de l'échantillon aurait été nécessaire pour être en mesure de détecter des écarts potentiels entre la zone d'activité agricole intense et la zone témoin, pour au moins un bassin versant.

**Tableau N Probabilité prédite de trouver un puits avec présence de bactéries selon la zone, le type de puits et le type de site d'entreposage de fumier**

Type de site d'entreposage de fumier	Zone	Type de puits		
		Profond	En surface	Captage
Fosse	Agricole intense	0,02	0,06	0,11
	Témoin	0,02	0,05	--
Plate-forme	Agricole intense	0,13	0,30	0,46
	Témoin	0,11	--	--
Réservoir en sol	Agricole intense	0,17	0,37	--
	Témoin	0,15	--	--
Tous les types d'amas	Agricole intense	0,06	0,16	0,28
	Témoin	0,05	0,14	--
Aucun	Agricole intense	0,03	0,09	0,17
	Témoin	0,03	0,08	0,14

*Note* : Lorsque la cellule contient « -- », c'est que la probabilité n'a pu être estimée faute de données disponibles.

## 5 DISCUSSION

### 5.1 VARIATIONS RÉGIONALES DE LA QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE

Les sections précédentes ont permis de jeter un regard d'ensemble sur la qualité de l'eau à partir de paramètres qui ne tiennent pas compte de plusieurs aspects, comme la géologie des dépôts superficiels, la topographie, les pratiques agricoles et l'occupation du territoire. Les commentaires qui suivent contribuent à une meilleure compréhension des différentes observations sur la qualité de l'eau souterraine selon la région et le bassin versant.

#### 5.1.1 Région de Chaudière-Appalaches

Cette région comprend trois bassins hydrologiques contigus, tous caractérisés par une intense activité agricole, soit ceux des rivières Boyer, Etchemin et Chaudière.

##### 5.1.1.1 Bassin de la rivière Boyer

Dans ce bassin, 27 puits ont été échantillonnés dont deux puits de surface. On n'a pas observé de contamination par des *E. coli*, mais deux puits profonds ont montré la présence de bactéries entérocoques; ils contiennent aussi des concentrations infimes en nitrates (carte 9).

La teneur moyenne en nitrates dans les puits analysés est de 2,24 mg/L-N et la médiane est de 0,32 mg/L-N. On observe aussi que 26 % des puits ont une concentration en nitrates au-dessus de 3 mg/L, et deux des puits excèdent la norme de 10 mg/L-N, même si ce sont des puits profonds. Les puits où les concentrations sont plus grandes ne sont pas contigus et sont éloignés de plusieurs kilomètres les uns des autres (carte 4) et n'indiquent pas qu'une portion significative du territoire soit contaminée. Il y a par contre un lien statistique significatif qui indique que l'activité agricole, dans ce petit bassin, a eu un impact sur la qualité de l'eau, du moins pour ce qui est des nitrates.

##### 5.1.1.2 Bassin de la rivière Etchemin

Le bassin de la rivière Etchemin est situé immédiatement au sud et à l'ouest de la rivière Boyer. Les sols y sont relativement minces et recouvrent des roches qui sont peu perméables. Quatre-vingt-sept puits dont 22 % sont des puits de surface qui ont été échantillonnés. La contamination par des bactéries est rare : un cas de puits profond avec une cellule de *E. coli* et quatre autres puits dans lesquels on a trouvé de une à deux bactéries entérocoques, trois de ces quatre cas sont dans des installations tout près de la rivière.

Vingt pour cent des puits présentent des concentrations en nitrates qui excèdent 3 mg/L-N et quatre puits ont des concentrations plus grandes que la norme de 10 mg/L-N. Ces puits sont très dispersés et entourés de puits non contaminés. La teneur moyenne en nitrates est de 2,42 mg/L-N et la médiane de 0,27 mg/L-N. Cette valeur moyenne est la plus élevée de tous les bassins versants examinés dans cette étude. À l'échelle de la carte 4, on peut voir que plusieurs des points présentant des anomalies se situent tout près de la rivière et il est possible qu'il y ait interférence avec les eaux de surface. La coïncidence entre une contamination bactérienne et une teneur significative de nitrates ne se produit que dans un cas, soit 1,1 % des puits.

##### 5.1.1.3 Bassin de la rivière Chaudière

Le bassin de la rivière Chaudière est le plus étendu, mais son activité agricole est essentiellement concentrée dans le tiers inférieur de son cours (partie nord). Un total de 274 puits ont été échantillonnés dont 89 servent de puits témoins (33 %). Presque tous les puits témoins se trouvent dans le haut du bassin,

au sud, dans une région qui est boisée et où la villégiature est une activité importante. Trente-deux pour cent des puits sont des puits de surface tant dans la zone d'agriculture intensive que dans la zone témoin.

La contamination bactérienne a été observée dans 24 puits, quatre avec une cellule de *E. coli*, quatre avec *E. coli* et entérocoques et 18 avec entérocoques seulement. Six des cas de contamination se trouvent en zone témoin et les autres, dans la zone d'activité agricole intense. En pourcentage, il y a un peu moins de puits contaminés en zone témoin (6,7 %) qu'en zone agricole intensive (9,7 %). La répartition de ces points sur le territoire (carte 9) est assez aléatoire, sauf pour deux paires de puits voisins qui sont contaminés.

Il y a 34 puits (12 %) dont la teneur en nitrates excède 3 mg/L-N dont 5 au-delà de la norme de 10 mg/L-N. Vingt des 34 puits avec des valeurs élevées de nitrates sont des puits de surface ou des captages de sources, ce qui tend à soutenir l'hypothèse que la contamination en nitrates est plus commune près de la surface qu'en profondeur. La teneur moyenne et la valeur médiane en nitrates sont respectivement de 1,67 mg/L-N et 0,33 mg/L-N dans les puits localisés dans la zone d'agriculture intensive. Pour la zone témoin, ces mêmes paramètres sont plus faibles et sont respectivement de 0,5 mg/L-N et 0,14 mg/L-N. Seul un puits de la zone témoin excède le seuil de 3 mg/L-N pour les nitrates. La zone d'agriculture intensive est localisée en bonne partie dans une région où la surface du terrain est assez accidentée, ce qui favorise le ruissellement au détriment de l'infiltration et pourrait expliquer les différences de teneur moyenne en nitrates dans les bassins voisins.

La coïncidence de contamination bactérienne et de concentration en nitrates au-dessus de 3 mg/L-N ne se rencontre que dans trois cas, soit environ 1 % de tous les puits analysés.

### 5.1.2 Région du Centre-du-Québec

La région du Centre-du-Québec est caractérisée par la plaine du Saint-Laurent et les premiers plis des Appalaches. Le terrain est relativement plat et, en plusieurs endroits près du fleuve, une épaisse couche d'argile marine sépare la surface des eaux souterraines profondes.

#### 5.1.2.1 Bassin de la rivière Nicolet

Le bassin de la Nicolet est une zone où l'agriculture est d'abord centrée davantage sur la production laitière et ensuite sur l'élevage du porc. Les surplus de phosphore sont moins grands dans ce bassin que dans les autres régions étudiées. Deux cent soixante-quatre puits dont 14 témoins ont été analysés. Vingt et un pour cent des puits sont des installations de surface.

On a relevé sept puits avec une contamination par *E. coli*, quatre avec *E. coli* seulement et trois autres avec *E. coli* et entérocoques. Quatre des puits affectés sont des installations de surface. Seize autres puits ont montré une contamination par des bactéries entérocoques seulement. Selon la carte 3, la plupart des puits contaminés se trouvent dans la partie sud du bassin, là où la couverture argileuse n'existe plus.

On compte 34 puits (13 %) dont la concentration en nitrates est au-delà de 3 mg/L-N et la teneur maximale de 10 mg/L-N est excédée six fois. La distribution des puits plus riches en nitrates est assez aléatoire sur la carte 8 et il n'y a pas de tendance particulière qui se dégage. La teneur moyenne et la valeur médiane en nitrates sont respectivement de 1,29 mg/L-N et 0,08 mg/L-N dans les puits de cette région, ce qui est relativement faible et pourrait s'expliquer par des facteurs géologiques et aussi par le type d'agriculture pratiqué. La coïncidence de la contamination bactérienne avec une valeur de nitrates de 3 mg/L-N et plus se rencontre sept fois, soit 2,6 %.

### 5.1.3 Région de la Montérégie

Cette région compte un très grand nombre de producteurs agricoles et le relief est relativement plat dans la partie nord et devient plus accidenté au sud-ouest, en contact avec les Appalaches. L'argile marine couvre de vastes étendues dans la plaine du Saint-Laurent, alors qu'ailleurs les sols minces sur roc peu perméables dominent.

#### 5.1.3.1 Bassin de la rivière Yamaska

Le vaste bassin de la rivière Yamaska a été échantillonné plus que tout autre bassin. Quatre cent soixante et un puits dont 37 témoins ont servi à caractériser cette région. Seulement 15 % des puits sont des puits de surface. Tous les puits témoins sont situés en terrain plus accidenté dans le sud du bassin où une bonne partie du territoire est boisée.

La présence de bactéries a été mesurée dans 21 puits de ce bassin : sept cas de *E. coli* ont été rapportés dont deux contenaient aussi des entérocoques. Dix-sept puits contenaient des concentrations variables d'entérocoques. La distribution des anomalies est assez aléatoire, mais un petit nombre de puits contaminés se trouvent au centre du bassin (carte 6).

Trente-sept puits (8 %) ont une teneur en nitrates au-delà de 3 mg/L-N et 13 d'entre eux excèdent la norme de 10 mg/L-N. La distribution des puits contaminés est assez générale mais, comme pour les bactéries, la région située au centre présente plus de cas de mauvaise qualité de l'eau souterraine. La valeur moyenne de nitrates pour tout le bassin est de 1,12 mg/L-N et la médiane est sous le seuil de détection. Ces valeurs moyennes sont très faibles et montrent que les matériaux de surface sont efficaces pour enrayer la migration de polluants de la surface jusqu'aux nappes profondes.

Il y a seulement six cas (1,3 %) de coïncidence d'une contamination bactérienne avec la présence d'une teneur en nitrates de 3 mg/L-N ou plus. Cette observation s'ajoute aux autres qui indiquent qu'il n'y a pas de relation forte entre la contamination en nitrates et la contamination bactérienne et l'hypothèse d'une source commune est difficile à soutenir.

### 5.1.4 Région de Lanaudière

La région de Lanaudière est très active dans l'élevage de porcs et c'est dans cette région que les surplus en phosphore atteignent les valeurs les plus élevées. Deux bassins de tailles très différentes sont documentés.

#### 5.1.4.1 Bassin de la rivière L'Assomption

L'échantillonnage dans ce bassin est assez différent de ce qui s'est fait dans les autres bassins. Cent vingt-sept puits font partie de l'échantillon, mais 77 sont des puits témoins et seulement 50 sont des puits en zone d'agriculture intensive. Il est à remarquer aussi que 58 % des puits sont des installations de surface et que la zone témoin est représentée par 70 % de puits de surface.

Seul un cas de contamination par *E. coli* a été relevé et six autres puits présentaient une contamination par des entérocoques uniquement. Ce qui est paradoxal, c'est que cinq des six puits contaminés se trouvent en zone témoin. La carte 5 illustre la position de ces puits répartis sur tout le territoire. Le paradoxe peut s'expliquer de la manière suivante : la zone témoin est localisée au nord du bassin dans des endroits de villégiature où les puits sont peu profonds et où les formations superficielles sont riches en sables et en graviers perméables. La région d'agriculture intensive au sud du bassin recouvre en bonne partie une plaine d'argile plutôt imperméable de sorte que les puits profonds sont isolés des eaux de surface de moins bonne qualité.

Seulement 7 % des puits présentent une teneur en nitrates au-delà du seuil de 3 mg/L-N; de ce nombre, deux puits excèdent la norme de 10 mg/L-N, les deux étant situés dans la zone témoin. Les valeurs moyennes et médianes de nitrates en zone agricole intensive sont toutes les deux de 0,02 mg/L-N, ce qui est la limite de détection pour cette substance. Encore ici, les valeurs pour la zone témoin sont plus élevées et correspondent à une moyenne de 1,67 mg/L-N et une médiane de 0,72 mg/L-N. La zone agricole du bassin de la rivière L'Assomption est la seule à ne pas se différencier statistiquement de la zone témoin (prise dans son ensemble).

#### 5.1.4.2 Bassin de la rivière Bayonne

Le bassin de la rivière Bayonne est le plus petit ayant été étudié. Seulement 20 puits dont aucun témoin ont servi à l'enquête. Cinquante pour cent des puits sont des installations de surface. Aucun des puits n'a montré de contamination bactérienne et bien que 25 % des puits présentent une teneur en nitrates au-delà de 3 mg/L-N, dont un au-delà de la norme de 10 mg/L-N. Les valeurs moyennes et médianes des nitrates sont respectivement de 1,93 mg/L-N et de 0,61 mg/L-N.

## 5.2 NAPPES LIBRES ET NAPPES CAPTIVES (PUITS DE SURFACE ET Puits PROFONDS)

Parmi les variables principales qui permettent d'interpréter les données d'analyse de la qualité de l'eau souterraine, il y a le type d'aquifères, à nappe libre ou captive, qui affecte à la fois la vulnérabilité à la contamination et le type d'installation pour l'alimentation domestique en eau potable.

Les aquifères à nappe libre ont comme caractéristique principale d'être directement en contact avec la surface du terrain parce que leur sommet est une zone de sol non saturé à travers lequel les eaux de surface, la pluie et l'eau de fonte de la neige peuvent pénétrer directement par infiltration et percolation. Ces aquifères sont constitués de matériaux grossiers perméables comme les sables et les graviers. Dans ce type de formation géologique, il est facile d'aménager des puits de surface ou puits citernes de gros diamètre, mais il est très difficile de bien les protéger contre les contaminants qui s'y infiltrent à partir de la surface du terrain. La présente étude montre bien la fragilité de ce type d'installation.

Lorsque les nappes libres ont une grande épaisseur (plus de 10 mètres), l'exploitation avec des puits tubulaires profonds permet d'alimenter des réseaux municipaux, comme c'est le cas de plusieurs villes au Québec. Dans ce cas, la contamination bactérienne est un risque potentiel, mais la grande épaisseur de dépôts permet généralement de filtrer les eaux d'infiltration et la définition de périmètres de protection adéquats assure une bonne qualité d'eau.

Les aquifères à nappe captive sont séparés de la surface du terrain par une ou des couches géologiques de très faible perméabilité. Les argiles sont un exemple de formation qui sont presque imperméables. Les puits aménagés dans des aquifères à nappe captive sont nécessairement, selon notre définition, des puits profonds. Si un puits profond est bien aménagé, c'est-à-dire isolé des eaux de surface par des tubages bien cimentés aux sols et au roc au-dessus de la nappe, ce type de puits peut difficilement être contaminé par des bactéries qui sont effectivement filtrées par les matériaux peu perméables de surface. Par contre, s'il est mal aménagé et que les eaux de surface peuvent se glisser entre le tubage et le terrain naturel, la contamination peut se transmettre facilement en profondeur. Le nouveau *Règlement sur le captage des eaux souterraines* (15 juin 2002) du ministère de l'Environnement du Québec exige maintenant le scellement des puits pour assurer la protection de l'eau souterraine.

La très grande majorité des puits profonds forés au Québec sont des puits au roc qui s'alimentent par un réseau de fractures plus ou moins bien connectées entre elles. La plupart de ces formations rocheuses sont des aquifères de faible rendement en matière de capacité à fournir des débits importants pour des utilisateurs collectifs, comme les municipalités ou les industries. Parce que ces aquifères sont peu perméables et qu'ils ont des réseaux de fractures souvent discontinus, il y a peu de chances que la contamination provenant d'une source ponctuelle s'étende très loin. C'est ce que les données de l'étude

tendent à confirmer en montrant qu'il est très rare d'observer deux puits voisins contaminés par des bactéries pathogènes.

### 5.3 CIRCULATION DE L'EAU SOUTERRAINE ET ALIMENTATION EN EAU POTABLE DES RÉSIDENCES ISOLÉES

La circulation de l'eau souterraine dans les matériaux naturels dépend essentiellement de trois facteurs : la conductivité hydraulique (ou perméabilité), la porosité (volume de vides dans un milieu) et le gradient hydraulique (ou la pente du niveau d'eau de la nappe). La vitesse de circulation de l'eau se calcule en multipliant la conductivité par le gradient et en divisant par la porosité du milieu. Les matériaux les plus perméables, comme les graviers et les sables, ont aussi une porosité importante qui occupe typiquement de 30 à 40 % du volume. Les roches fracturées sont peu perméables, mais leur capacité à laisser circuler de l'eau dépend essentiellement des fractures qu'elles contiennent et de leur interconnexion en trois dimensions. Les gradients hydrauliques varient typiquement entre 1/100 et 1/1000 ou moins dans les matériaux perméables.

En combinant ces facteurs d'une grande variété de sols et de roches avec des valeurs de perméabilité et de porosité, on conclut que la vitesse naturelle de l'eau souterraine est souvent d'un mètre ou moins par année et, dans des cas exceptionnels, elle peut atteindre plusieurs dizaines de mètres par an. Le volume d'eau pompé d'un puits domestique est petit et, conséquemment, un tel pompage ne perturbe que très peu l'écoulement naturel de l'eau souterraine. Dans cette perspective, un puits contaminé est avant tout influencé par une source de contamination située à proximité.

L'autre aspect à considérer pour l'alimentation en eau potable domestique est le volume qui est prélevé chaque année en relation avec l'infiltration ou la recharge dans l'aquifère qui alimente ce puits. En prenant comme valeur de la consommation moyenne 500 L/jour par personne, on obtient environ 180 m<sup>3</sup>/an par personne et pour une famille on peut estimer en arrondissant à 1000 m<sup>3</sup>/an. Ce volume d'eau est normalement compensé par l'infiltration de l'eau de pluie ou de la fonte de la neige sur une superficie de terrain donnée. Pour une infiltration moyenne de 100 mm/an, il faut un hectare de terrain pour assurer la consommation annuelle, et pour un terrain correspondant à une superficie de 50 ha (dimension moyenne des terres agricoles selon l'UPA), il ne faut que 5 mm par an d'infiltration pour assurer le renouvellement de la quantité d'eau pompée.

Ce calcul montre que, dans la majorité des cas, l'eau qui est pompée par un puits domestique provient du terrain même de celui qui pompe cette eau. En conséquence, la contamination de l'eau souterraine des puits domestiques a sa cause la plus probable sur la propriété de celui qui l'exploite. Les sources les plus habituelles de contamination sont la présence d'installations sanitaires et l'activité agricole à proximité du puits d'alimentation. Le mauvais aménagement des puits (scellement des tubages inadéquat) est probablement la cause immédiate de la contamination bactérienne de l'eau souterraine. Dans le cas de la contamination par les nitrates, l'augmentation de la concentration au cours des années peut agir comme un mécanisme qui doit être surveillé avec le temps parce que la présente étude montre qu'il y a un lien statistique définitif entre les zones d'activité agricole intense et la probabilité d'observer des teneurs en nitrates de 3 mg/L-N et plus dans l'eau souterraine.

### 5.4 TRANSPORT DES BACTÉRIES ET DES VIRUS

Les études sur le transport de bactéries et de virus dans les formations géologiques et leur présence dans les eaux souterraines se sont multipliées récemment (Azadpour-Keeley *et al.*, 2002; Ryan *et al.*, 1999; Faulkner *et al.*, 2002; Woessner *et al.*, 2002; Becker *et al.*, 2003; Guan *et al.*, 2003). Les facteurs importants qui affectent la mobilité des bactéries et des virus peuvent se classer en deux catégories : les propriétés intrinsèques des microorganismes et les caractéristiques du milieu physique.

Les propriétés des microorganismes qui ont une importance pour leur survie dans une formation aquifère comprennent la taille des cellules (micromètres pour les bactéries et dizaines de nanomètres pour les virus), la forme des cellules, la charge positive ou négative de surface, le pH isoélectrique de chaque espèce. Les facteurs liés au milieu comprennent la granulométrie des formations, la porosité et la dimension des pores, le pH ambiant, la température, le type de minéraux et les charges de surface associées, les paramètres hydrauliques d'écoulement tels qu'ils sont indiqués dans la section précédente.

Dans le cadre de la présente étude, nous tentons d'expliquer pourquoi un nombre très restreint de puits ont montré la présence de bactéries et pourquoi seulement quatre échantillons ont indiqué la présence de coliphages F-spécifiques.

#### 5.4.1 Contamination par les bactéries

Le petit nombre de puits ayant montré une contamination bactérienne peut surprendre au départ, compte tenu des études sur les eaux souterraines publiées au Québec et ailleurs. On peut critiquer le protocole sous deux aspects :

- 1) le mois de mai n'est peut-être pas le meilleur moment pour échantillonner puisque l'épandage de fumiers et lisiers ne se fait qu'en juin surtout et que la présence de bactéries dans l'eau souterraine semble plus importante en été (section 3.5 ci-dessus);
- 2) les bactéries qui ont été répandues en surface en automne ont probablement dépassé la durée de vie normale de telles bactéries dans les sols et les eaux souterraines.

À ces critiques on peut opposer ce qui suit : une des raisons de la divergence entre l'analyse des sept bassins versants et les études antérieures pourrait être la période durant laquelle se sont faits les échantillonnages, soit le mois de mai. La justification principale de ce choix, c'est qu'au Québec la recharge des nappes souterraines se produit surtout à la fonte des neiges lorsqu'il y a un surplus d'eau dans les sols et que la végétation n'a pas encore commencé à puiser l'eau du sol de manière significative. Tous les suivis de nappes au Québec montrent la même image et c'est essentiellement durant cet intervalle de temps qu'il y a connexion directe entre la surface et les eaux souterraines et s'il y a transport de microorganismes, c'est à ce moment que se fait leur transfert vers les eaux souterraines. Au cours de l'été, il est très rare d'enregistrer une infiltration significative d'eau de pluie parce que la végétation absorbe toute l'humidité disponible et que les sols enregistrent souvent un déficit d'eau qui empêche l'infiltration en profondeur. Une situation pourtant est possible : c'est l'infiltration provoquée en un endroit restreint par de l'eau provenant d'une installation septique. Toutefois, l'aménagement de champs d'épuration selon les normes en vigueur prévient ce type de problème.

Dans les sols servant à l'agriculture, il y a une proportion importante de sables fins, de limons et d'argile. La dimension des pores (interstices entre les grains du sol) qui existent dans ces matériaux est si petite que les bactéries sont en quelque sorte filtrées par les sols. Ce mécanisme de filtration est considéré comme prédominant par rapport aux autres mécanismes influençant le transport des bactéries. L'autre mécanisme dominant est la rétention sur des particules minérales chargées électriquement qui a un effet important sur la plupart des bactéries à des pH près de la neutralité.

Selon les études de la *Ground Water Rule* (U.S. Environmental Protection Agency, 2000), on reconnaît que les bactéries disparaissent rapidement par filtration, dégradation et adsorption, sauf dans deux contextes géologiques particuliers qui sont considérés comme très à risque: les aquifères superficiels dans des matériaux très grossiers tels les graviers et sables grossiers, et les aquifères dans le roc très fracturé près de la surface. Dans ces deux cas, la filtration est insuffisante, la vitesse de transport est rapide et les risques de contamination sont élevés. Les données recueillies au cours de notre étude ne permettent pas d'analyser en détail chaque cas de contamination, mais il serait pertinent de compléter une petite enquête sur ce sujet pour confirmer la nature des paramètres responsables de la contamination bactérienne.

L'étude des sept bassins versants englobait toutes sortes d'activités agricoles qui émettent des bactéries pathogènes dans l'environnement. En dehors de l'épandage des fumiers, toutes les activités liées aux aires d'entreposage de fumiers sont des sources actives toute l'année et sont indépendantes de la période choisie pour l'échantillonnage.

Une cause probable de la contamination observée dans les puits est l'aménagement du puits ou du point de captage des eaux souterraines. Les notes, commentaires et observations recueillis dans le questionnaire (annexe A) mènent à certaines correspondances de cause à effet, mais il n'y a pas eu de suivi sur le terrain, sauf pour l'échantillonnage périodique de mai à novembre sur un petit nombre de puits dans la MRC de Montcalm. Il serait pertinent de vérifier d'autres points problématiques. Ainsi, la source de contamination semble être immédiate dans plusieurs cas, c'est-à-dire à l'intérieur d'un périmètre de quelques dizaines de mètres du puits, plutôt qu'attribuable à des causes plus lointaines, puisque le mouvement de l'eau souterraine est très lent et que la durée de survie des bactéries est limitée.

#### 5.4.2 Absence de virus coliphages F-spécifiques

Le protocole de l'étude comprenait l'analyse des virus coliphages F-spécifiques, un microorganisme indicateur de pollution fécale complémentaire à *E. coli* et aux entérocoques. Seulement quatre échantillons sur l'ensemble des 2 070 prélevés dans l'ensemble du projet ont montré la présence de coliphages. De ceux-là, deux sont dans la zone témoin, deux sont associés à une contamination par *E. coli* et la teneur en nitrates n'excède 3 mg/L-N que dans un cas seulement.

D'autres études ont aussi obtenu un faible taux de détection des coliphages F-spécifiques. Borchardt *et al.* (2003) ont détecté des coliphages F-spécifiques dans 1 % (2/193) des échantillons lors d'une étude sur une cinquantaine de puits individuels (échantillonnés quatre fois chacun). Alors que des volumes d'échantillon de 100 mL ont été utilisés pour la recherche des coliphages dans la présente étude, ces chercheurs ont utilisé des échantillons de 1 000 mL, ce qui augmentait la sensibilité de l'analyse. Utilisant aussi des échantillons de 1 000 mL, Fugioka et Yoneyama (2001) n'ont pas détecté de coliphages F-spécifiques dans 32 puits municipaux.

Outre le volume analysé, d'autres facteurs peuvent expliquer la rareté de la détection des coliphages F-spécifiques. D'abord, le sol lui-même peut limiter le transport des virus vers l'eau souterraine. Dans les références consultées, on nomme comme facteurs principaux de l'atténuation des virus dans le sous-sol, les suivants : l'adsorption sur des particules minérales ou sur des oxydes de fer entourant les grains minéraux, la charge électrique des virus qui favorise leur adhésion sur les surfaces solides en fonction des ions présents dans l'eau ou encore du pH isoélectrique qui détermine la charge nette d'un virus, la dénaturation des virus, leur oxydation, ou leur assimilation par d'autres microorganismes.

Ensuite, les fèces des humains et des animaux ne contiennent pas toujours des coliphages F-spécifiques. Par exemple, Osawa *et al.* (1981) ont détecté des coliphages F-spécifiques dans seulement 2,4 % (14/597) échantillons de fèces humaines, alors qu'ils n'en ont pas détectés dans 20 échantillons de fèces de bovin et dans 11 échantillons de fèces de porc. Havelaar *et al.* (1990) ont rarement détecté des coliphages F-spécifiques dans les fèces d'humains et de bovins, mais plus souvent dans les fèces de porcs et de poulets adultes.

Ainsi, la rareté de la présence des coliphages F-spécifiques dans les matières fécales, les mécanismes d'atténuation des virus dans le sol ainsi que l'analyse d'un volume d'échantillon relativement restreint expliquent que peu d'échantillons contenant des coliphages F-spécifiques ont été détectés dans cette étude.



## 6 CONCLUSIONS

### 6.1 RÉSUMÉ DES FAITS SAILLANTS

Les résultats de cette enquête représentent une première étude détaillée de la qualité de l'eau souterraine en relation avec les activités agricoles au Québec. D'autres études plus ponctuelles avaient déjà été publiées, mais sans que soit garanti le processus d'échantillonnage qui doit demeurer aléatoire et indépendant des hypothèses formulées d'avance. De plus, le choix des paramètres d'analyse a été restreint à un petit nombre d'éléments propres à l'activité agricole, soit les nitrates provenant des engrais minéraux ou de fumier, et les micro-organismes indicateurs d'agents pathogènes d'origine fécale, provenant de l'entreposage et de l'épandage du fumier ou des installations sanitaires des résidences isolées.

Le Québec dispose maintenant d'une base de données qui pourra servir d'étalon pour des études semblables dans le futur afin d'examiner les effets d'une politique ou d'une réglementation sectorielle. Plus de deux mille échantillons ont été prélevés (dont plus de 800 pour les besoins de l'étude sur *l'Influence de la vulnérabilité des aquifères sur la qualité de l'eau des puits individuels dans la MRC de Montcalm*), et leur représentativité du territoire agricole est illustrée sur les cartes en annexe. Le choix de sept bassins versants représentant une très grande partie de l'activité agricole au Québec, surtout en ce qui a trait à l'élevage porcin ou bovin, facilite l'étude sur la qualité de l'eau souterraine dans ces régions où l'eau de surface est sérieusement affectée par la présence d'excès de phosphore et d'azote.

Les protocoles d'échantillonnage et d'analyse ont été élaborés par des spécialistes de plusieurs ministères afin d'obtenir des résultats les plus probants qui soient et aussi pour répondre aux préoccupations de chaque partenaire. Les équipes de terrain ont bénéficié d'une formation adéquate et plusieurs contrôles internes et externes ont permis de vérifier en tout temps la bonne marche du processus. Le questionnaire illustré en annexe a aussi été conçu pour favoriser la cueillette uniforme de données à tous les endroits visités pour assurer la couverture la plus complète possible des facteurs qui affectent la qualité des eaux souterraines.

À la question posée comme objectif de l'étude, à savoir si l'élevage intensif influence négativement la qualité de l'eau potable des résidents en milieu rural, les résultats observés semblent démontrer un effet sur la concentration de nitrates mais non sur la qualité microbiologique. Cependant, la réponse à cette question doit être nuancée. D'entrée de jeu, le faible taux de dépassement des normes ou de contamination rend l'analyse statistique moins performante. Il signifie aussi que la population rurale peut dans son ensemble s'approvisionner en eau potable de bonne qualité.

Par ailleurs, il faut noter que cette étude est limitée de plusieurs façons :

- 1) la mesure de l'exposition est très imprécise (indice de phosphore) : ni l'impact de l'épandage de fumiers ni l'impact des autres activités agricoles n'ont pu être mesurés de façon précise;
- 2) le protocole d'échantillonnage (à cause des nombreux refus) pourrait poser des problèmes de représentativité;
- 3) la représentativité des puits privés échantillonnés comme indicateurs de la qualité des nappes d'eau souterraine des régions étudiées est incertaine;
- 4) l'évaluation de la variation saisonnière n'a été contrôlée que sur un petit nombre de puits;
- 5) la recherche des facteurs responsables de la contamination par questionnaire est limitée et ne prend pas en compte la vulnérabilité des sols ou la présence d'autres sources de pollution dans ces territoires.

Il n'a pas été possible de faire l'analyse pour les nitrates au seuil représentant la norme de qualité de l'eau potable (10 mg/L-N). Cependant, au seuil de 3 mg/L-N, qui représente l'influence de l'activité humaine sur la qualité de l'eau souterraine, la zone agricole est significativement plus affectée que la zone témoin.

Cette conclusion, obtenue à la lumière des données recueillies dans le cadre de cette étude, indique que l'activité agricole génère un surplus de nitrates qui migre vers l'eau souterraine.

Sous l'aspect de la contamination bactériologique, l'influence de l'activité agricole ne peut pas être mise en cause. L'information tirée du suivi mensuel illustre une dynamique de contamination qui prend sa source localement et qui se manifeste indépendamment des grands mouvements de l'eau souterraine. Il existe néanmoins une relation significative entre la présence de bactéries dans l'eau et le type de site d'entreposage de fumier. Cette relation devrait être vérifiée par des études précises.

## 6.2 LES PRINCIPAUX CONSTATS DE L'ÉTUDE

- Le faible nombre de dépassements des normes pour les indicateurs microbiologiques semble contredire les résultats d'autres études publiées au Québec et en Amérique du Nord. Cependant, dans la plupart d'entre elles, les *coliformes totaux* étaient utilisés comme indicateurs et non pas uniquement les indicateurs de contamination fécale (*E. coli* et entérocoques) comme dans cette étude-ci.
- En mai 2002, il n'y avait pas d'évidence de contamination importante des nappes souterraines, tant d'un point de vue microbiologique qu'en matière de nitrates, puisque les cas de contamination avec dépassement de normes étaient isolés. L'examen des points au voisinage d'un puits contaminé montre que les voisins sont très rarement contaminés. L'effet de contamination, pris au sens strict de dépassement de norme, est considéré comme local et on émet l'hypothèse que la source de contamination se trouve fort probablement dans l'environnement immédiat du puits.
- Le suivi mensuel de juillet à novembre 2002 indique que la qualité chimique de l'eau mesurée par les nitrates est presque constante et que les faibles variations ne sont pas liées à des activités saisonnières.
- Le suivi mensuel des indicateurs microbiologiques dans les puits montre une contamination bactérienne plus fréquente en été (juillet et août surtout) et moindre en mai et à l'automne. Les cas de contamination sont sporadiques, c'est-à-dire que certains puits sont contaminés une fois seulement ou, si plus d'une fois, pas nécessairement lors de mois consécutifs. Les résidents étant avertis de la contamination de leur eau, on leur recommandait de désinfecter leur puits. Environ la moitié des répondants ont fait désinfecter leur puits, mais dans 50 % des cas la contamination revenait le mois suivant. Le choix des puits pour ce suivi mensuel n'est pas représentatif des puits utilisés pour la caractérisation des sept bassins versants puisque les puits du suivi mensuel ont été sélectionnés dans le but d'observer une variation éventuelle de la qualité de l'eau et que, par conséquent, une majorité de puits sont des installations de surface.
- De tous les paramètres analysés, ce qui ressort le plus nettement comme la variable expliquant le mieux la qualité de l'eau, c'est le type de puits. Si on distingue un puits profond comme étant un forage de plus de 8 m de profondeur et un puits de surface défini comme une installation d'une profondeur de moins de 8 m, en incluant le captage de sources, la nette majorité des puits contaminés par des nitrates ou des bactéries sont des puits de surface. Cette situation a été observée dans la majorité des études réalisées sur le sujet.

## 7 RECOMMANDATIONS

Le lien probable entre l'activité agricole et la concentration au-delà du seuil de 3 mg/L-N en nitrates, surtout lorsque détecté sur l'ensemble du territoire, suggère une tendance qu'il faudra surveiller. Il est donc recommandé qu'un réseau permanent de surveillance de la qualité des eaux souterraines soit mis en place pour documenter l'évolution de la qualité des eaux souterraines et aider à mieux gérer la protection de cette ressource.

Le manque de connaissance de la dynamique de migration de la contamination microbiologique est mis en évidence dans cette étude et est largement rapporté dans la littérature. Pour ce qui est des nitrates, les résultats sont davantage en accord avec les modèles d'interprétation habituels. Des études, prenant en considération l'ensemble des facteurs pouvant influencer la dynamique de contamination par les micro-organismes et par les nitrates dans les eaux souterraines, devraient être encouragées pour préciser les modes de migration, la nature des sources et leur étendue spatiale. Ces études devraient couvrir tant les cas de fertilisation des terres que l'évacuation et le traitement des eaux usées d'une résidence isolée.



## RÉFÉRENCES

- Azadpour-Keeley, A., B.R. Faulkner and J.J. Chen, 2003. Movement and Longevity of Viruses in the Subsurface. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/540/S-03/500, avril 2003, 24 p.
- Becker, M.W., D.W. Metge, S.A. Collins, A.M. Shapiro et R.W. Harvey, 2003. Bacterial transport experiments in fractured crystalline bedrock. *Ground Water*, vol. 41, no. 5 p.682-689.
- Borchardt, M. A., P. D. Bertz, S. K. Spencer et D. A. Battigelli, 2003. Incidence of Enteric Viruses in Groundwater from Household Wells in Wisconsin. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 69, no. 2, p. 1172-1180.
- Chartrand, J., Levallois, P., Gauvin, D., Gingras, S., Rouffignat, J., Gagnon, M-F. 1999. « La contamination de l'eau souterraine par les nitrates à l'île d'Orléans ». *Vecteur Environnement*. Vol. 32, no 1, janvier, p. 37-46.
- Evangelou, V.O., 1998. *Environmental Soil and Water Chemistry – Principles and Applications*. New York, John Wiley & Sons, 564 p.
- Faulkner, B.R., W.G. Lyon, F.A. Khan, S. Chattopadhyay, 2002. Predicting Attenuation of Viruses During Percolation in Soils -1. Probabilistic Model, U.S. Environmental Protection Agency, (EPA/600/R-02/051a August 2002) 43 p., 2. User's Guide to the Virulo 1.0 Computer Model (EPA/600/R-02/051b August 2002), 27 p.
- Fujioka, R. S. et B. S. Yoneyama, 2001. Assessing the vulnerability of groundwater sources to fecal contamination, *Journal AWWA*, vol. 93, no 8, p. 62-71.
- Gangbazo, G., Piché, I., McCormack, R., Dion, J. 1993. *Contamination des eaux souterraines par les nitrates à Saint-Bernard de Beauce*. Ministère de l'Environnement du Québec. Direction du milieu agricole et du contrôle des pesticides. Direction des écosystèmes urbains. Québec. 17 p.
- Gaudreau, D., Mercier, M. 1998. *La contamination de l'eau des puits privés par les nitrates en milieu rural*. Module de Santé environnementale. Direction de la santé publique. Régie Régionale de la Santé et des Services sociaux de la Montérégie. ISBN : 2-89342-107-5. 64 p.
- Guan, H., D. Schulze-Makuch, S. Schaffer, S.D. Pillai, 2003. The effect of critical pH on virus fate and transport in saturated porous medium. *Ground Water*, vol. 41, no. 5, p.701-708.
- Havelaar, A. H., W. M. Pot-Hogbeem, K. Furuse, R. Pot et M. P. Hormann, 1990. F-specific RNA bacteriophages and sensitive host strains in faeces and wastewater of human and animal origin, *Journal of Applied Bacteriology*, vol. 69, no. 1, p. 30-37.
- Nolan, B. T., Stoner, J.D. 2000. « Nutrients in Groundwaters of the Conterminous United states, 1992-1995 ». *Environmental Science & Technology*. Vol. 34, no. 7. p. 1156-1165.
- Osawa, S., K. Furuse et I. Watanabe, 1981. Distribution of Ribonucleic Acid Coliphages in Animals, *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 41, no. 1, p. 164-168.
- Paradis, D., Bernier, P.J., Levallois, P. 1991. *Qualité de l'eau souterraine dans la MRC de Portneuf*. Opérations régionales. 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.

- Rudolph, D., Goss, M., Graham, A., Kawachanoski, G., Scafe, A. et al. 1993. *Ontario Farm Groundwater Quality Survey : Summer 1992*. Édité par D. Rudolph et M. Goss. Waterloo Centre for Groundwater Research ; Centre for Land and Water Stewardship (Guelph). 162 p. Préparé pour Agriculture Canada.
- Ryan, J.N., M. Elimelech, R.A. Ard, R.W. Harvey, et P.R. Johnson, 1999. Bacteriophage PRD1 and silica colloid transport and recovery in an iron oxide-coated sand aquifer. *Envir. Sci. Technol.* vol. 33, p. 63-73.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2000. National Primary Drinking Water Regulations: Ground Water Rule; Proposed Rules. *Federal Register*, 40 CFR Parts 141 and 142, Wednesday May 10, 2000. p. 30194-30274
- Woessner, W.W., P.N. Ball, D.C. DeBorde, and T.L. Troy, 2002. Viral transport in a sand and gravel aquifer under field pumping conditions. *Ground Water*, vol. 39(6), p. 886-894.

## **ANNEXE 1**

### **QUESTIONNAIRE UTILISÉ PAR LES ÉCHANTILLONNEURS**



Numéro d'échantillon \_\_\_\_\_

## ÉCHANTILLONNAGE DE L'EAU DES PUIITS PRIVÉS

*Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier  
et impacts potentiels sur la santé*

### IDENTIFICATION DES RÉSIDENTS

#### 1. Adresse du lieu de prélèvement

Nom: \_\_\_\_\_

Adresse: \_\_\_\_\_

Municipalité: \_\_\_\_\_

Code postal: \_\_\_\_\_

Téléphone: \_\_\_\_\_

#### 2. Adresse du propriétaire

Même adresse que la résidence

Nom: \_\_\_\_\_

Adresse: \_\_\_\_\_

Municipalité: \_\_\_\_\_

Code postal: \_\_\_\_\_

Téléphone: \_\_\_\_\_

3. Date de la prise d'échantillon \_\_\_\_\_

4. Heure de la prise d'échantillon \_\_\_\_\_

### INFORMATIONS SUR LE POINT DE CAPTAGE DE L'EAU POTABLE

#### 5. Informations sur le traitement de l'eau

Quel(s) type(s) de système(s) de traitement de l'eau utilisez-vous?

Aucun

Non fonctionnel

Désinfection

Chloration    Modèle \_\_\_\_\_

Ultraviolet    Modèle \_\_\_\_\_

Autre(s) :

---

---

---

---

---

---

Adoucisseur      Modèle \_\_\_\_\_

Élimination du fer      Modèle \_\_\_\_\_

Charbon activé      Modèle \_\_\_\_\_

Osmose inverse      Modèle \_\_\_\_\_

Distillateur      Modèle \_\_\_\_\_

Filtre au sable      Modèle \_\_\_\_\_

Autre(s) :

---

---

---

---

---

---

---

---

❖ Date et nature du dernier entretien

---

---

---

---

---

---

**6. Emplacement du robinet utilisé**

Cuisine     Salle de bain     Robinet extérieur     À la pompe ou au réservoir

Sous-sol     Autre(s) \_\_\_\_\_





**ACTIVITÉS AGRICOLES**

IL FAUT S'ASSURER QUE LA PERSONNE INTERROGÉE EST PROPRIÉTAIRE DU TERRAIN QUI FAIT L'OBJET DES QUESTIONS

**14. Y a-t-il des activités agricoles autour du point de captage (surtout en amont et jusqu'à environ 500 m)?**

Si oui :

- Champs en culture (Voir aussi question 15)
- Élevage (Voir aussi question 18)
- Pâturage (Voir aussi question 20)

Si non :

- Boisé  Friche

**15. Si culture (au cours des trois dernières années), de quel type s'agit-il? (Cette question ne peut être posée que si la personne interrogée est propriétaire du terrain en question.)**

- Maïs
- Pommes de terre
- Maraîchers
- Céréales
- Prairies
- Autre(s) :

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**16. Y a-t-il utilisation de produits de fertilisation autour du point de captage?**

(TOUJOURS EN TENANT COMPTE QUE LA QUESTION PEUT ÊTRE POSÉE SEULEMENT SI LA PERSONNE INTERROGÉE EST PROPRIÉTAIRE DU TERRAIN.)

- Si oui :       Engrais chimiques       Fumier       Compost  
 À quelle distance de l'ouvrage de captage?       Moins de 30 m (0 - 100')       30 m et plus (>100')
- Aucun

**17. Quelle est la distance entre les champs en culture et le point de captage?**

- Moins de 30 m (0 - 100')
- Entre 30 et 100 m (100 - 300')
- Entre 100 et 500 m (300 - 1500')
- Plus de 500 m (>1500')

**18. Si élevage, de quel type s'agit-il?**

- Bœufs de boucherie
- Porcs
- Vaches laitières
- Volailles
- Autre(s) :

---

---

---

---

**DONNÉES RECUEILLIES À L'EXTÉRIEUR**

**19. Y a-t-il présence d'une cour d'exercice du bétail?**

- Non
- Oui

Si oui :

À quelle distance du point de captage?

- Moins de 30 m (0 - 100')
- 30 m et plus (>100')
- Ne sait pas

**20. S'il y a pâturage, quelle est sa distance du point de captage?**

- Moins de 30 m (0 - 100')
- 30 m et plus (>100')

**21. Y a-t-il des sites d'entreposage de fumier (surtout situés en amont de l'ouvrage de captage)?**

- Non
- Oui

Si oui :

De quel type d'entreposage s'agit-il? De quel type de gestion s'agit-il?

- Amas  Fumier solide
- Fosse  Fumier liquide
- Plate-forme
- Réservoir en sol
- Amas au champ de fumier solide
- Autre(s) (ou commentaire)

---

---

---

---

---

---

**22. Les sites d'entreposage sont-ils situés en amont (« plus haut »), en aval ou au même niveau que le point de captage?**

- Amont                       Aval                       Au même niveau

**Coordonnées du site d'entreposage** (Ne traversez pas chez le voisin pour les prendre : estimez plutôt la distance).

MTM (NAD 83) X \_\_\_\_\_ MTM (NAD 83) Y \_\_\_\_\_

Zone \_\_\_\_\_

Distance estimée (le cas échéant) \_\_\_\_\_

**Ouvrage de captage**

**23. Diamètre ou dimension du captage (si possible, mesurez et notez)**

- 10 cm (4")       15 cm (6")       25 cm (10")       Plus de 1 m (>3')

❖ Dimension                      Longueur \_\_\_\_\_                      Largeur \_\_\_\_\_

❖ Matériaux                       Métal       Bois       Béton       Pierres cordées

Note : \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**24. Longueur « hors terre » de la tête de puits?**

- Enterrée (profondeur) \_\_\_\_\_       Au ras du sol  
 Entre 0 et 15 cm (0 - 6")       Entre 15 et 30 cm (6" - 12")       Plus de 30 cm (>12")

**25. Coordonnées de l'ouvrage de captage**

MTM (NAD 83) X \_\_\_\_\_ MTM (NAD 83) Y \_\_\_\_\_

Zone \_\_\_\_\_

**26. Quelle est la distance entre le puits et le fossé de la route?**

- Entre 0 et 3 m (0 - 10')       Entre 3 m et 10 m (10' - 30')       Plus de 10 m (>30')

**Installation septique**

**27. Les installations septiques sont-elles situées en amont , en aval ou au même niveau que votre puits d'alimentation en eau?**

- Amont                       Aval                       Au même niveau

**28. Quelle est la position du point d'infiltration le plus proche du captage?**

MTM (NAD 83) X \_\_\_\_\_ MTM (NAD83) Y \_\_\_\_\_

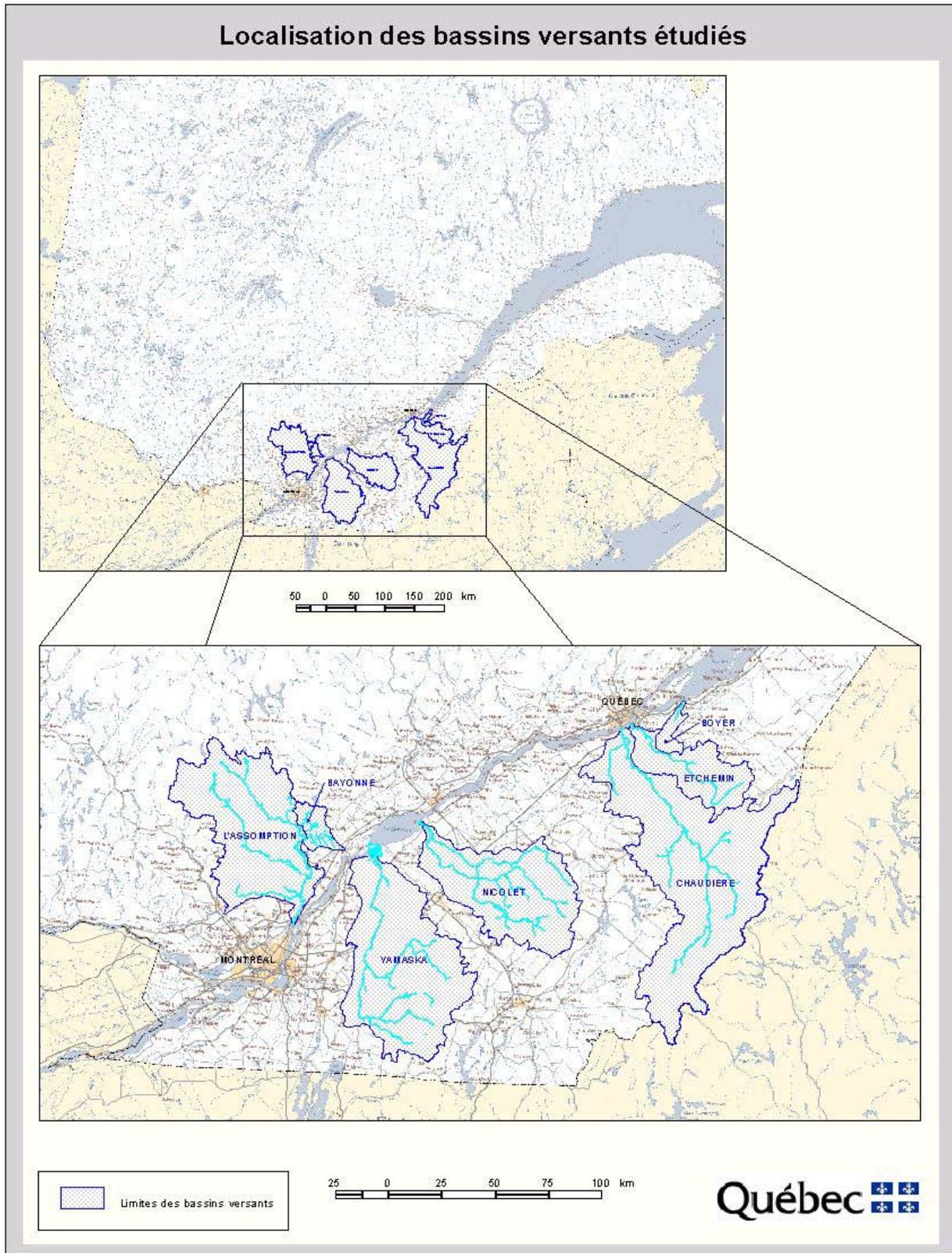
Zone \_\_\_\_\_



**ANNEXE 2**  
**CARTES**

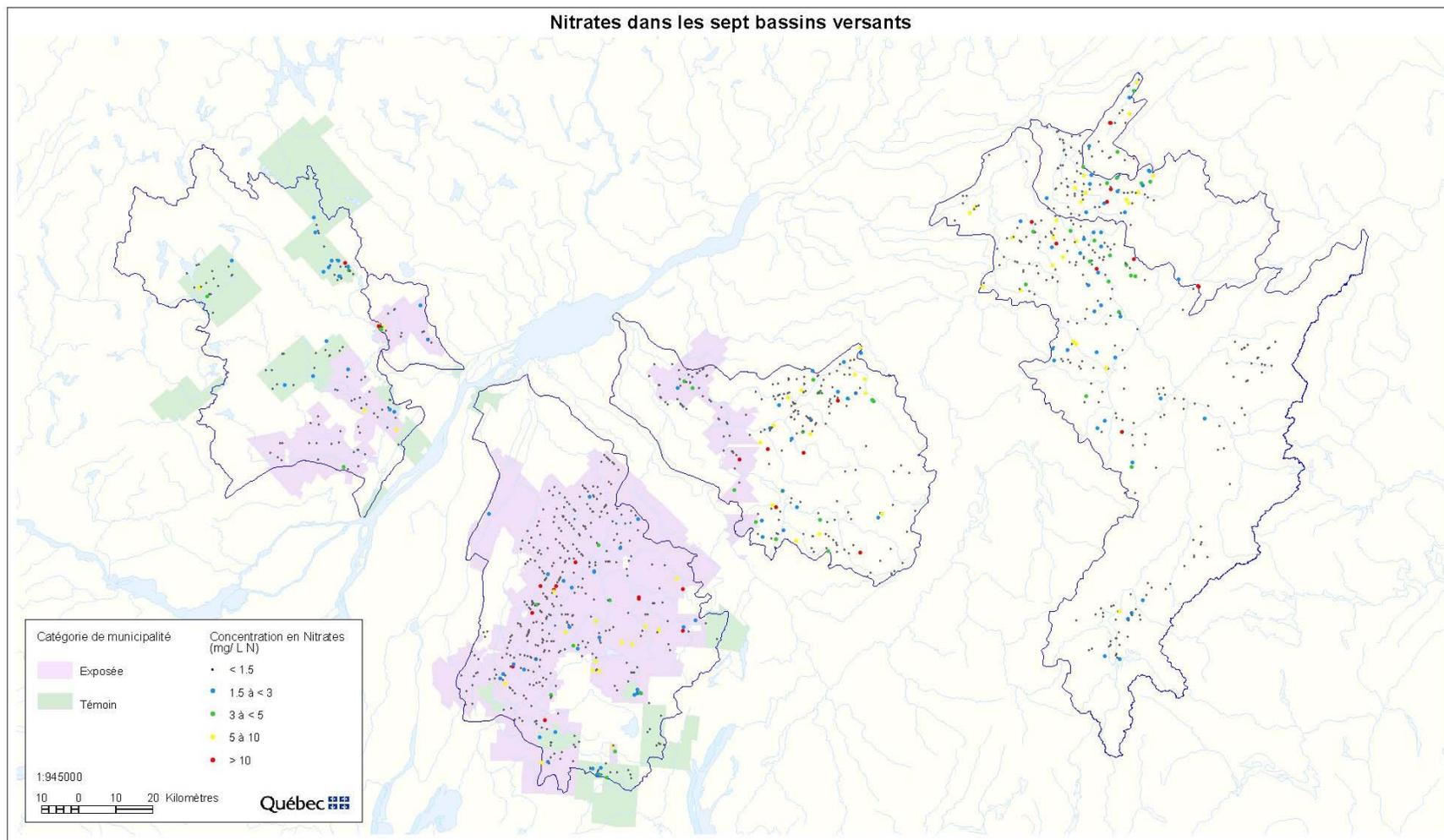


Carte 1



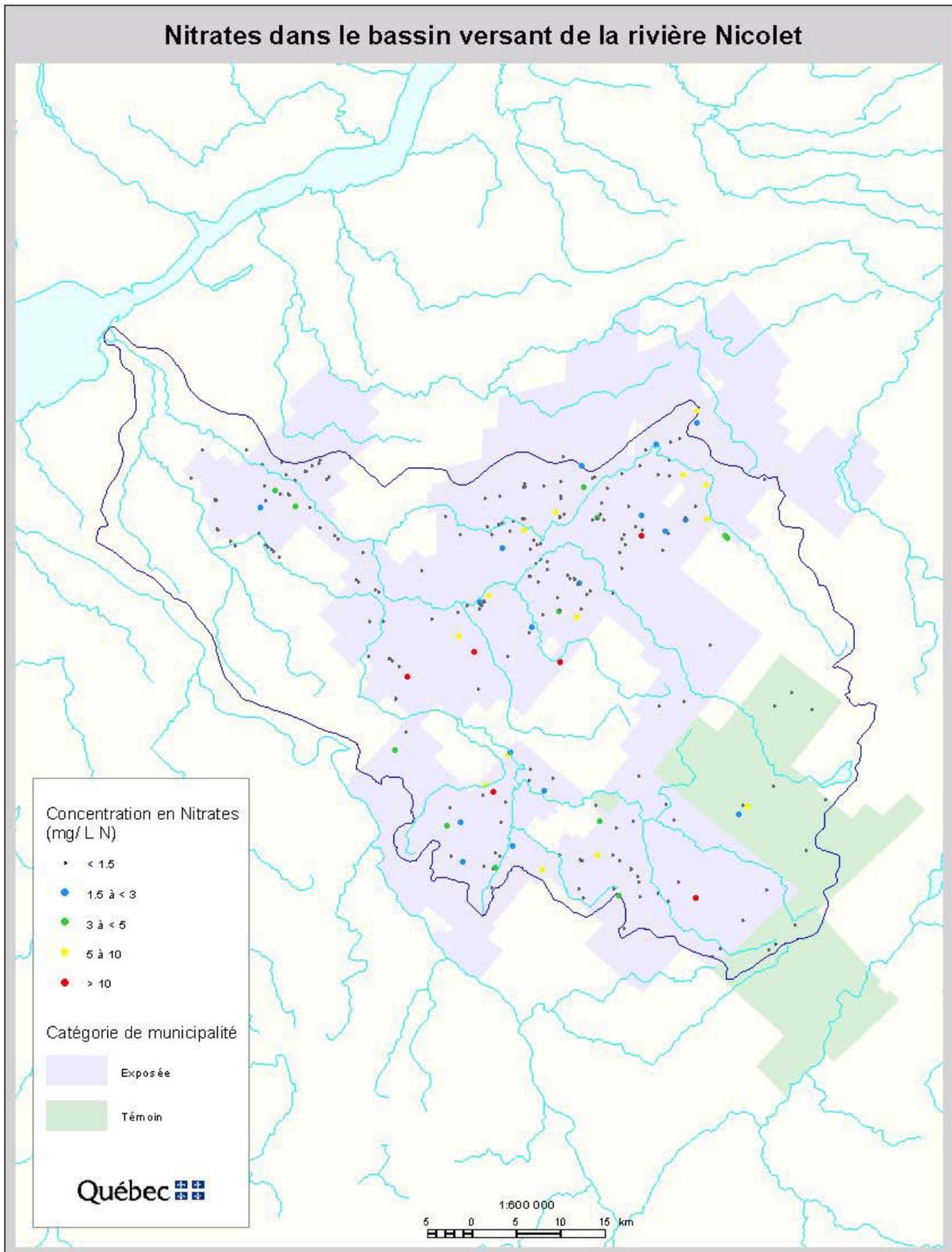


Carte 2



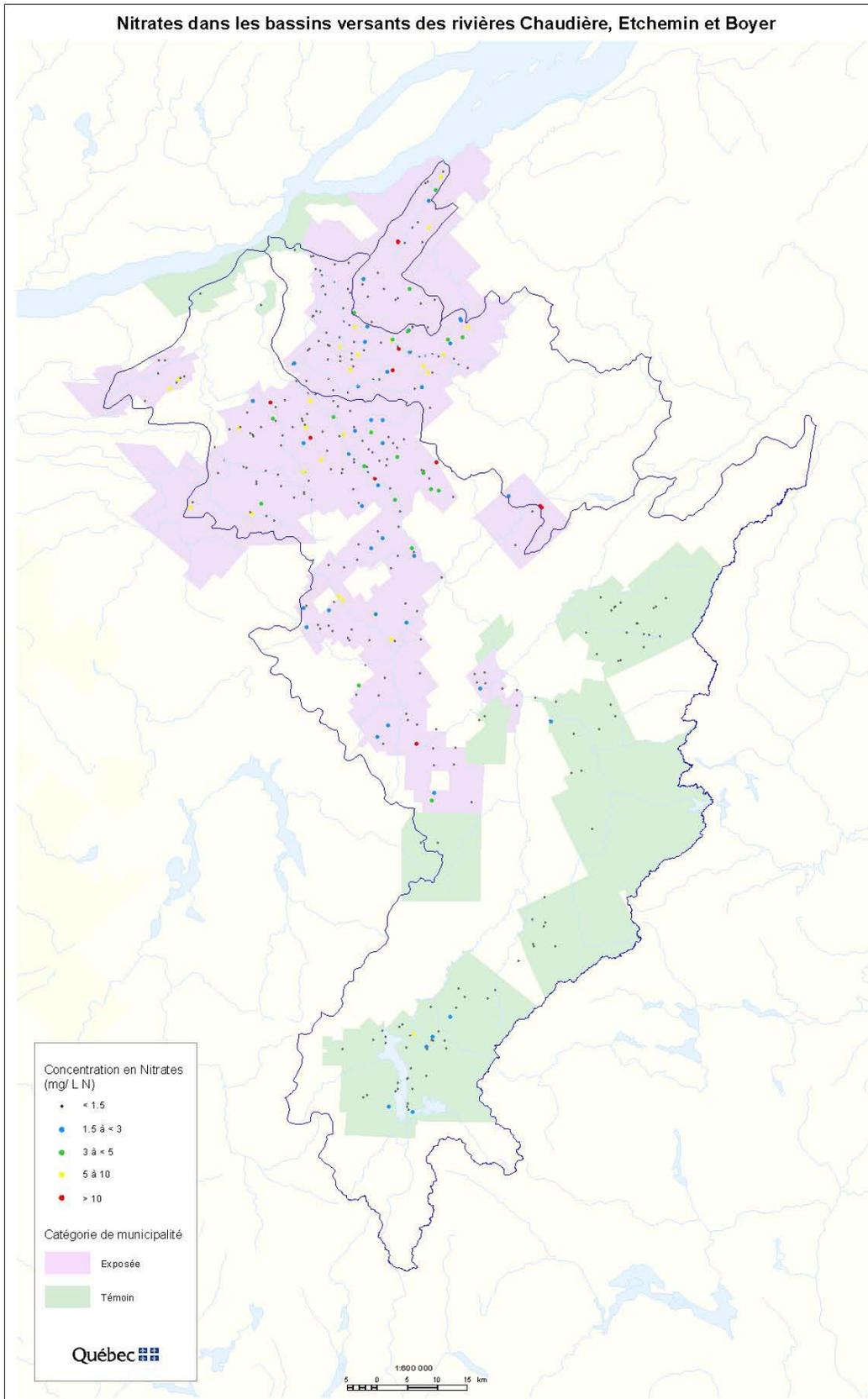


Carte 3



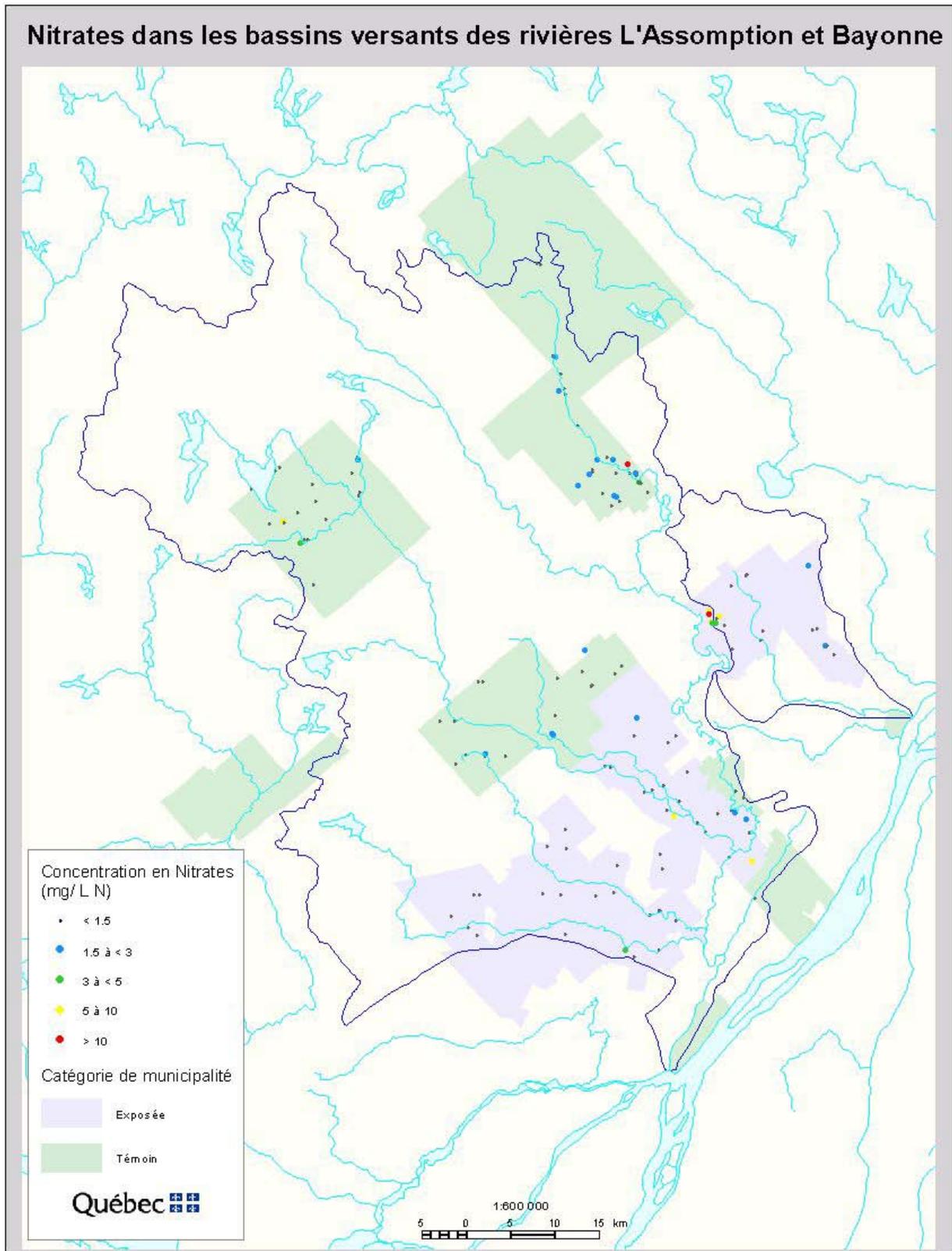


Carte 4



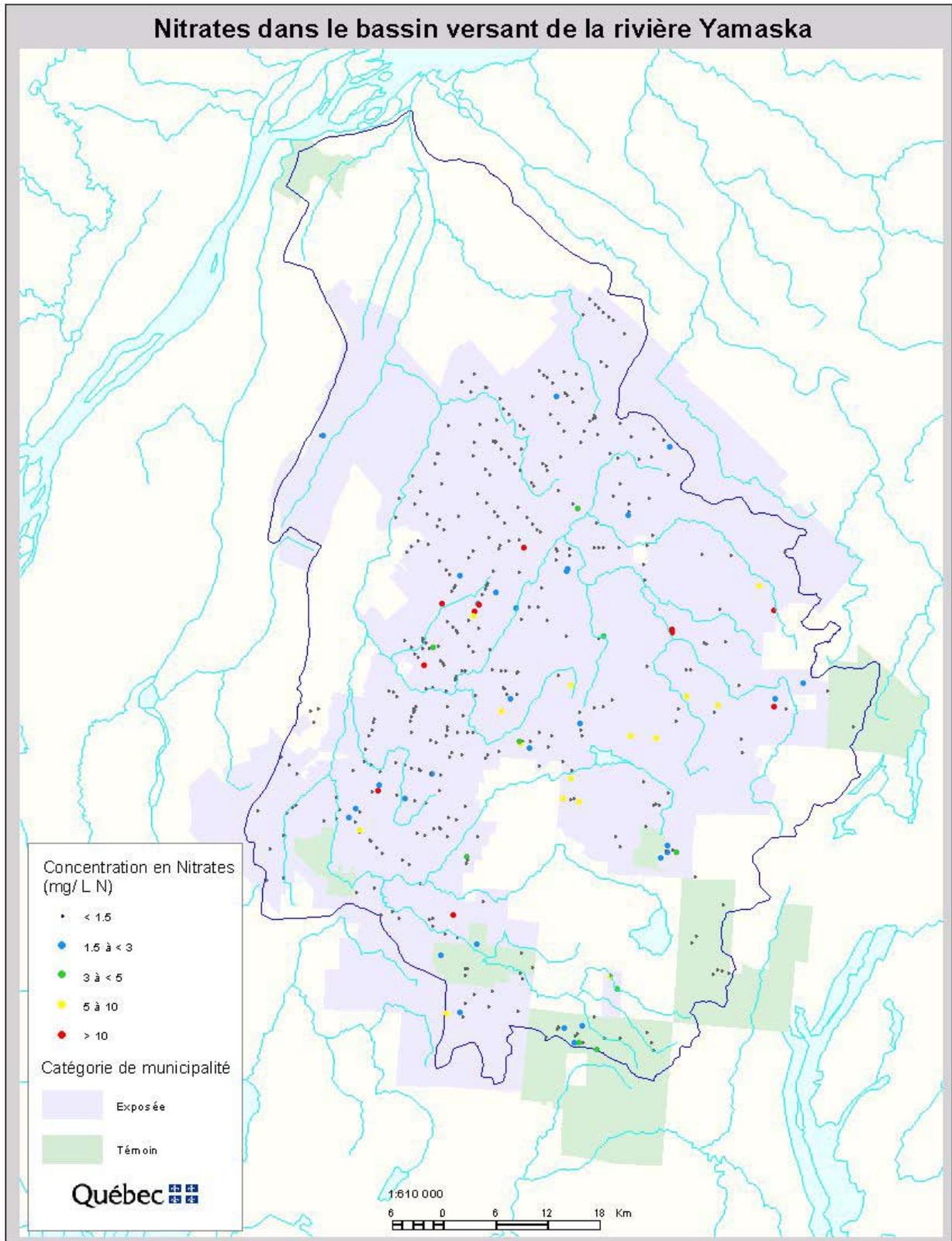


Carte 5



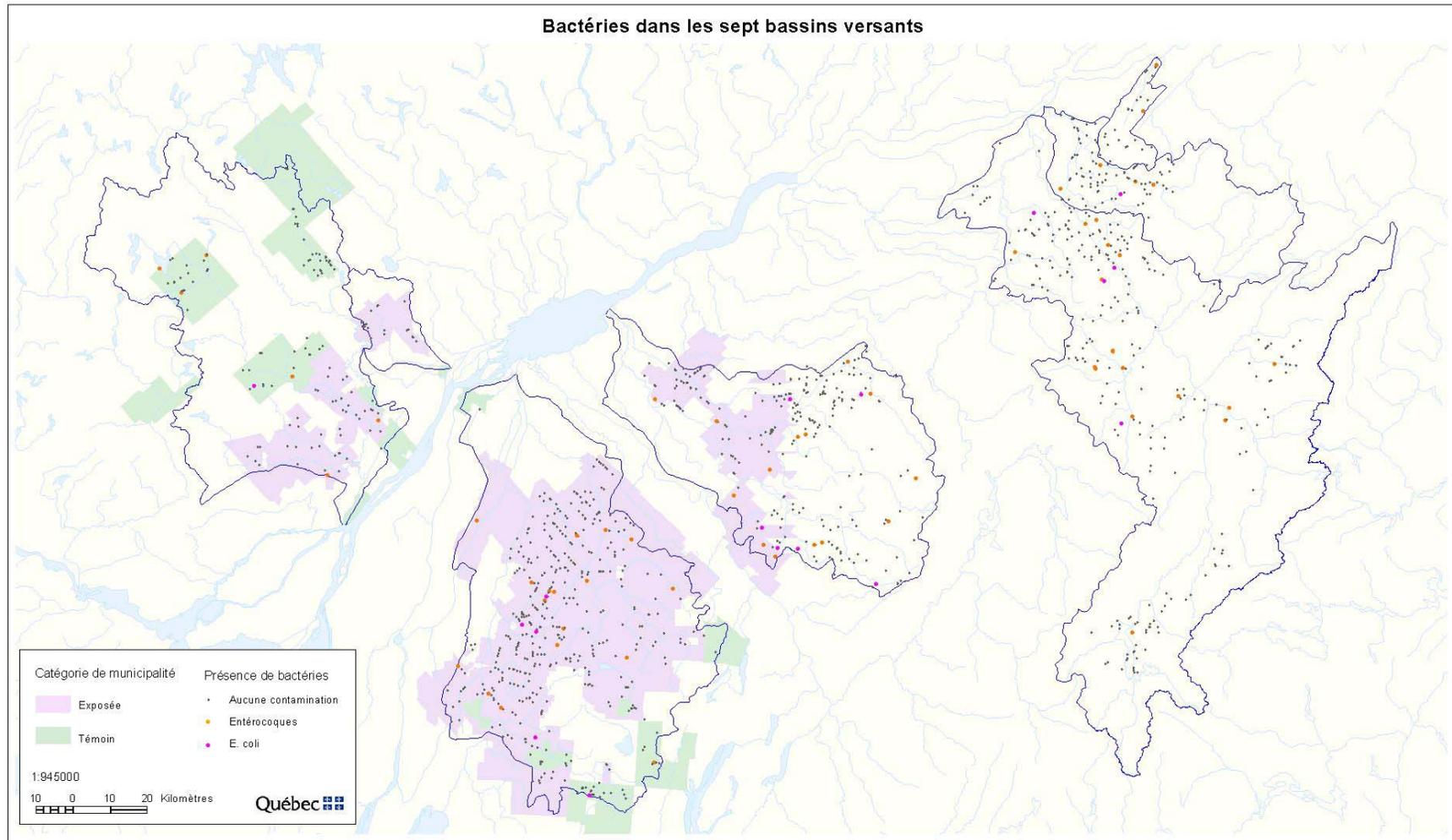


Carte 6



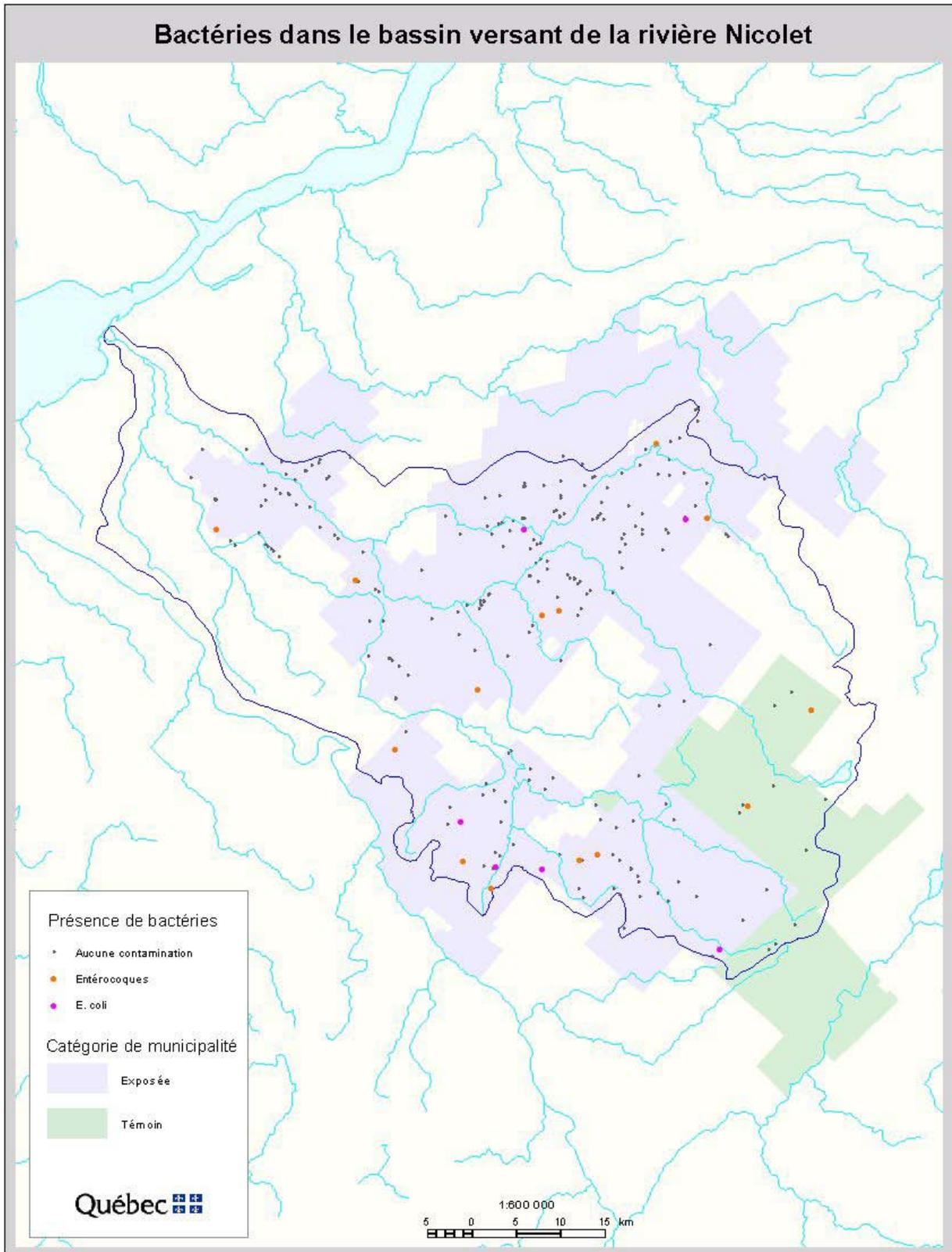


Carte 7



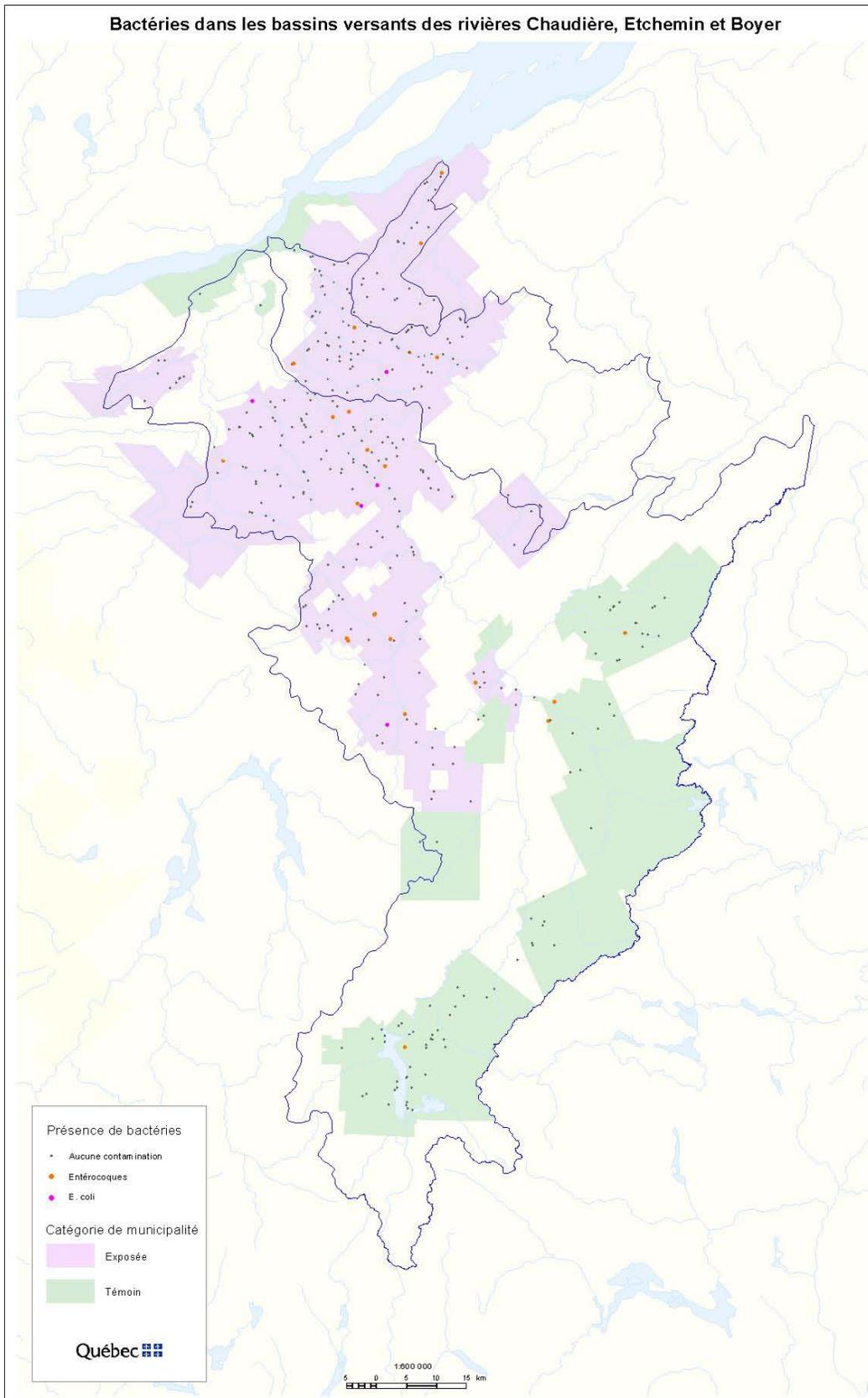


Carte 8



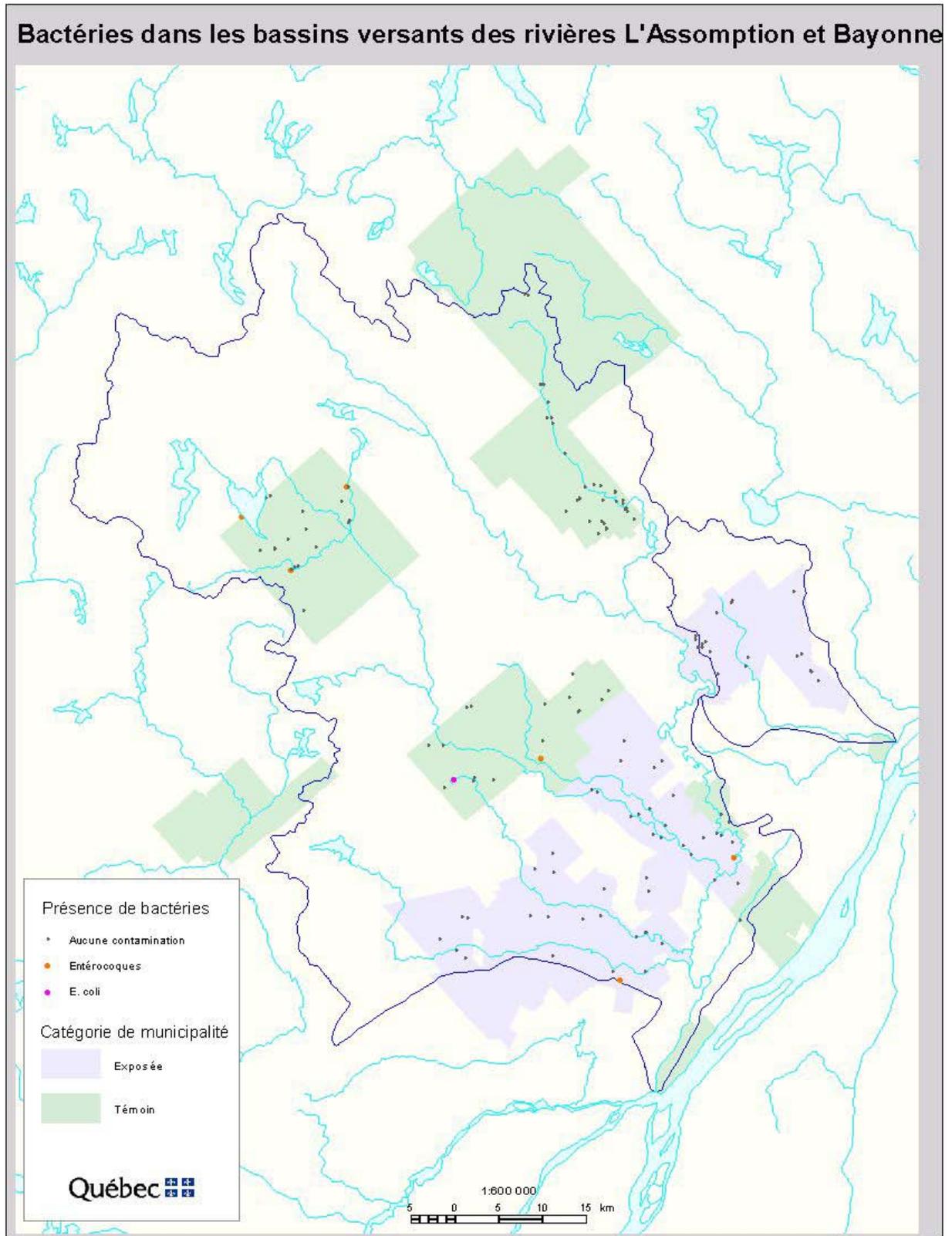


Carte 9



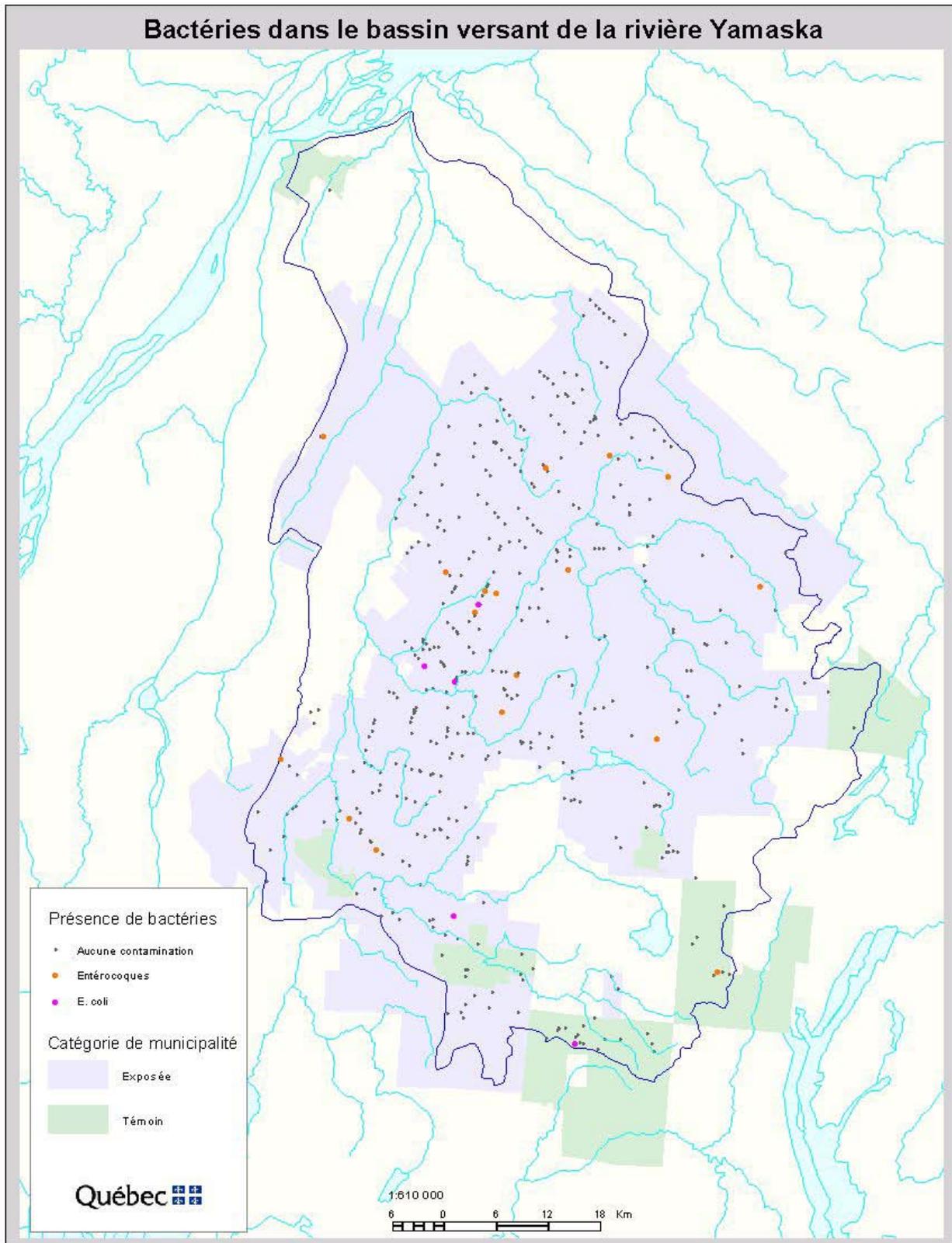


Carte 10





Espace réservée pour la carte 11





## **ANNEXE 3**

### **RAPPORT DE L'ANALYSE STATISTIQUE**



**RAPPORT DE L'ANALYSE STATISTIQUE  
DE DONNÉES PROVENANT DE  
LA CARACTÉRISATION DE L'EAU SOUTERRAINE  
DANS LES SEPT BASSINS VERSANTS**

Rapport méthodologique

Catherine Fontaine  
Nathalie Plante  
Direction de la méthodologie, de la démographie  
et des enquêtes spéciales

Institut de la statistique du Québec

19 mars 2003



## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. CONTEXTE .....</b>	<b>3-7</b>
1.1 DESCRIPTION DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS.....	3-7
<b>2. DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>3-9</b>
2.1 PLAN DE SONDAGE .....	3-9
2.2 PONDÉRATION .....	3-9
2.3 DESCRIPTION DU MODÈLE DE RÉGRESSION LOGISTIQUE .....	3-11
<b>3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS POUR L'ANALYSE DE LA CONCENTRATION EN NITRATES.....</b>	<b>3-15</b>
3.1 VARIABLES CONSIDÉRÉES .....	3-15
3.2 ANALYSES EXPLORATOIRES .....	3-16
3.3 MODÈLE INCLUANT LA ZONE COMME VARIABLE EXPLICATIVE.....	3-16
3.4 MODÈLE INCLUANT LA STRATE D'ÉCHANTILLONNAGE COMME VARIABLE EXPLICATIVE.....	3-17
3.5 INTERPRÉTATION DES MODÈLES RETENUS .....	3-17
<b>4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS POUR L'ANALYSE DE LA PRÉSENCE DE BACTÉRIES.....</b>	<b>3-19</b>
4.1 VARIABLES CONSIDÉRÉES .....	3-19
4.2 ANALYSES EXPLORATOIRES .....	3-20
4.3 MODÈLE INCLUANT LA ZONE COMME VARIABLE EXPLICATIVE.....	3-20
4.4 MODÈLE INCLUANT LA STRATE D'ÉCHANTILLONNAGE COMME VARIABLE EXPLICATIVE.....	3-22
4.5 INTERPRÉTATION DES MODÈLES RETENUS .....	3-24
<b>5. MISES EN GARDE .....</b>	<b>3-29</b>
<b>6. CONCLUSION.....</b>	<b>3-29</b>



# 1 CONTEXTE

## 1.1 DESCRIPTION DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS

L'Institut de la statistique du Québec (ISQ) a été mandaté par le ministère de l'Environnement du Québec (MENV) afin d'effectuer des analyses statistiques s'inscrivant dans le cadre de l'*Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants<sup>1</sup> en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé*. Le premier volet de l'étude a pour objectif de déterminer s'il y a un lien entre la présence de l'activité agricole et la qualité de l'eau potable de puits, sur l'ensemble du territoire composé des sept bassins versants. Des analyses statistiques ont été effectuées à cet effet. Une première mesure de la qualité de l'eau potable des puits est la concentration en nitrates selon qu'elle excède ou non un certain seuil qui est de 3,0 mg/L-N de nitrates par échantillon d'eau. L'activité agricole intensive est représentée par une variable qui définit une zone composée de municipalités dont le pourcentage du territoire agricole est supérieur à 25 % et dont le bilan de phosphore est excédentaire. Une telle zone sera nommée « en surplus de fumier » et sera opposée à une zone « témoin », dont le pourcentage du territoire agricole est inférieur à 25 % et dont le bilan de phosphore est déficitaire. Une deuxième mesure de la qualité de l'eau potable des puits est la présence de bactéries dans l'échantillon d'eau. Les bactéries à l'étude sont les *E. coli* et les entérocoques.

---

1. L'Assomption, Bayonne, Boyer, Chaudière, Etchemin, Nicolet et Yamaska.



## 2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE

### 2.1 PLAN DE SONDAGE

Le plan de sondage présenté dans cette section a été élaboré par le ministère de l'Environnement. La population visée par l'étude est l'ensemble des puits de résidence se trouvant dans sept bassins versants au Québec. Puisqu'il n'a pas été possible de constituer une liste fiable de tous les puits visés par l'étude, la base de sondage a été composée de bâtiments se situant dans les sept bassins versants étudiés. La liste des bâtiments, constituée à partir de cartes géographiques, excluait les silos ou des grands bâtiments (par exemple, des grands entrepôts). Un certain nombre des bâtiments de la base de sondage pouvaient être associés à un puits admissible à l'étude. La sélection des bâtiments (sans remise) est faite selon un plan de sondage aléatoire stratifié combiné à une procédure de remplacement des unités inadmissibles ou non répondantes<sup>2</sup>. Une unité (bâtiment) est dite inadmissible si elle ne correspond à aucun puits (codes « autre », « cabane à sucre », « grange », « réseau », « vieux bâtiment ») ou si le puits qui lui est associé est relié à un système de traitement de l'eau (codes « rejeté » et « syst. traitement »). Les strates sont au nombre de huit, soit sept strates correspondant aux sept bassins versants en zone agricole et une correspondant à l'ensemble des zones témoins.

### 2.2 PONDÉRATION

Puisque l'inférence des résultats doit porter sur l'ensemble de la population visée, une étape de pondération a dû être effectuée par l'ISQ. La pondération vise à associer un poids à chacun des puits desquels un échantillon d'eau (puits répondants) a été obtenu. Ce poids est le nombre de puits que chacun des puits répondants représente au sein de la population visée, cette dernière comprenant l'ensemble des puits admissibles. Puisqu'une procédure de remplacement a été utilisée, le poids associé à un puits répondant devrait idéalement tenir compte de tous les chemins possibles pour la sélection de ce puits. Or, compte tenu de l'information disponible, cela n'est pas possible. L'hypothèse plutôt faite est que le puits répondant possède des caractéristiques semblables au puits non répondant préalablement sélectionné pour le même voisinage. Le fait que l'unité répondante ne corresponde pas nécessairement à l'unité initialement sélectionnée peut ainsi être négligé.

Définissons par le terme « ferme » un groupe de bâtiments liés entre eux et pouvant être desservis par un puits. Pour une strate donnée, la sélection d'une ferme est faite avec probabilité proportionnelle au nombre de bâtiments associés au bâtiment initialement sélectionné. Puisque le taux d'échantillonnage est faible, l'hypothèse qui est faite est que la ferme a été sélectionnée avec remise et que la probabilité de sélection de la ferme  $i$  au sein d'une strate est donnée par :

$$p_i = n \frac{M_i}{\sum_{i=1}^N M_i}$$

où  $n$  est le nombre de bâtiments initialement sélectionnés au sein de la strate,  $N$  est le nombre total de fermes dans cette strate (inconnu) et  $M_i$  est le nombre de bâtiments associés à la ferme  $i$  (excluant les silos, etc.). Notons que cette dernière quantité n'est pas connue pour chacune des fermes, mais que le nombre total est connu pour une strate donnée (égal au nombre total de bâtiments dans la base de sondage pour cette strate).

2. Une unité est non répondante si elle peut être considérée comme admissible à l'étude, qu'aucun échantillon d'eau n'a été prélevé et qu'aucune réponse au questionnaire n'a été obtenue (par exemple, un refus de fournir un échantillon d'eau).

Pour calculer la quantité  $M_i$ , il n'était pas possible d'utiliser la base de sondage. En effet, cette dernière est constituée de bâtiments qui font partie des sept bassins versants de la population visée. Cependant, elle ne permet pas de lier entre eux les bâtiments afin de former une « ferme ». Il était donc impossible à l'aide de la base de sondage de calculer le nombre de bâtiments par «ferme», la quantité  $M_i$ , qui était requis dans le calcul de  $p_i$ . Une stratégie a été élaborée à l'aide du MENV afin de pouvoir associer à chaque «ferme» de l'échantillon un nombre de bâtiments.

- 1) Repérage automatisé des « fermes » de l'échantillon qui ne comptent qu'un bâtiment et qui se trouvent en zone urbaine ainsi que de celles qui se trouvent plutôt isolées géographiquement;
- 2) Repérage visuel sur les cartes des autres « fermes » de l'échantillon et estimation du nombre de bâtiments avec un certain niveau de confiance.

Le repérage des « fermes » du point 1 a été fait à partir de certains critères portant sur le nombre de bâtiments pour différents rayons autour du bâtiment sélectionné dans l'échantillon (« ferme »). Il a été possible de déterminer assez facilement le nombre de bâtiments de ces « fermes » (c'est-à-dire un) puisque cela représentait les cas les plus facilement reconnaissables. Ce premier repérage représente environ 4 % des bâtiments de l'échantillon.

Quant au deuxième repérage, il a été effectué à l'aide de cartes numérisées. Un nombre de bâtiments associés à celui sélectionné dans l'échantillon (ou « ferme ») a été calculé. Une cote indiquant un niveau de confiance en ce nombre a aussi été attribuée à chacun des bâtiments de l'échantillon : environ 94 % ont reçu une cote indiquant un niveau de confiance élevé ou très élevé et environ 2 % ont reçu une cote indiquant un niveau de confiance faible quant au nombre de bâtiments attribué. Dans ces cas, il était plutôt difficile d'établir avec exactitude les limites de la «ferme». Il a donc été décidé que, pour ces cas, le nombre de bâtiments moyen par strate calculé à partir de toutes les «fermes» dont le niveau de confiance n'est pas faible serait utilisé au lieu de la valeur calculée à partir des cartes numérisées. De cette façon, le biais introduit dans les estimations causé par une mauvaise valeur du nombre de bâtiments sera moins grand que si le nombre de bâtiments utilisé provenait du repérage visuel qui est plutôt incertain dans ces cas.

Pour une strate donnée, le poids  $w_i$  associé au puits répondant  $i$  (ou à la ferme  $i$ ) est tel que

$$\sum_{i=1}^r w_i = \hat{N}_a \quad \text{et donné par } w_i = \frac{\hat{N}_a}{M_i \sum_{j=1}^r 1/M_j} \quad \text{avec } \hat{N}_a = \hat{N} \hat{t}_a$$

où  $r$  est le nombre de répondants de la strate

$\hat{N}_a$  est le nombre total estimé de puits admissibles dans la strate

$\hat{N}$  est le nombre total estimé de puits dans la strate

$\hat{t}_a$  est le taux d'admissibilité estimé pour la strate

$$\text{avec } \hat{N} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i} \quad \text{et } \hat{t}_a = \frac{\sum_{i=1}^n I_i / M_i}{\sum_{i=1}^n J_i / M_i} \times \frac{\sum_{i=1}^n K_i / M_i}{\sum_{i=1}^n 1 / M_i}$$

où

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{si la ferme correspondant à la 1ère tentative avec statut d'admissibilité connu est} \\ & \text{admissible (cas "échantillonné")} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$J_i = \begin{cases} 1 & \text{si la ferme correspondant à la 1ère tentative avec statut d'admissibilité connu est} \\ & \text{reliée à un puits (admissible ou non) ou un réseau d'aqueduc (cas "échantillonné"} \\ & \text{ou "système de traitement" ou "rejeté" ou "réseau")} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$
$$K_i = \begin{cases} 1 & \text{si la ferme est reliée à un puits ou un réseau d'aqueduc (cas "échantillonné" ou "système} \\ & \text{de traitement" ou "rejeté" ou "réseau" ou "absent" ou "refus" ou "locataire" ou "chalet")} \\ & \text{peu importe si son statut d'admissibilité est connu ou non} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Notons que pour les « fermes » non reliées à un puits ou à un réseau d'aqueduc (cas « grange », « vieux bâtiment », « cabane à sucre » ou « autre »), le statut d'inadmissibilité n'est considéré que s'il s'agit de la ferme comprenant le bâtiment initialement sélectionné. Autrement, ces cas sont considérés comme des absences.

Une vérification a été effectuée afin d'évaluer s'il était possible d'estimer les taux d'admissibilité à un niveau géographique plus détaillé que la strate. En effet, si ces taux varient à l'intérieur de la strate, cela peut indiquer que certains puits admissibles qui sont entourés de puits inadmissibles ont plus de chances d'être sélectionnés que s'ils sont dans l'entourage de puits admissibles. Cela doit se refléter dans la pondération à l'aide de taux d'admissibilité variables, selon un découpage géographique à l'intérieur du bassin versant. La municipalité aurait pu être utilisée comme découpage géographique, cependant le nombre de bâtiments sélectionnés dans l'échantillon par municipalité était faible dans certains cas, ce qui aurait amené des taux d'admissibilité estimés avec une certaine imprécision. Certains regroupements de municipalités ont été tentés, mais aucun n'était satisfaisant afin d'estimer avec une bonne précision les taux d'admissibilité. Ainsi, ceux-ci ont été estimés par strate. Ces taux varient effectivement selon la strate, ce qui justifie le calcul de ces taux par strate (et non au global).

### 2.3 DESCRIPTION DU MODÈLE DE RÉGRESSION LOGISTIQUE

Afin de réaliser l'objectif d'analyse de la qualité de l'eau selon deux mesures, un modèle de régression logistique est utilisé. Ce modèle statistique est approprié puisque chacune des deux variables d'intérêt (qui sont aussi appelées les variables réponses) prend deux modalités<sup>3</sup>. Un tel modèle permet de déterminer les caractéristiques des puits ou de leur environnement selon lesquelles varie la proportion de puits dont la concentration en nitrates excède le seuil fixé (ou avec présence de bactéries). Lors de la construction de ce modèle, des variables ayant un lien statistiquement significatif avec la variable réponse pourront être identifiées. Un bon modèle statistique devrait par ailleurs inclure toutes les variables explicatives importantes et respecter les hypothèses statistiques sous-jacentes. Le modèle logistique présuppose que la proportion de puits dont la concentration en nitrates excède le seuil (ou avec présence de bactéries) est homogène pour toutes les combinaisons de variables explicatives.

3. Une troisième mesure, la présence de coliphages dans l'eau, n'a pas fait l'objet d'analyses statistiques. En effet, de tous les puits échantillonnés, un nombre très négligeable se retrouvait avec présence de coliphages. Il n'a donc pas été jugé utile d'effectuer une analyse statistique pour cette variable réponse.

Voici la définition du modèle logistique :

$$\log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_q x_{i,q}$$

où :

$$\log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \text{fonction logit de } p_i$$

$i = 1, \dots, n$  (et  $n$  représente le nombre de puits dans l'échantillon);

$p_i$  = probabilité que la concentration en nitrates du puits  $i$  soit au-dessus (ou égale) au seuil de 3,0 mg/l (ou que la présence de bactéries dans le puits  $i$ ) étant donné les valeurs prises par les variables explicatives pour ce puits;

$x_{ik}$  = variable explicative,  $k=1, \dots, q$  (et  $q$  est le nombre de variables explicatives du modèle);

$\beta_k$  = paramètre du modèle qui sera estimé et qui permet d'évaluer l'effet de la variable explicative correspondante.

Une variable explicative à  $m$  catégories est représentée au sein du modèle par  $m-1$  variables binaires décrivant à quelle catégorie un puits correspond.

Dans le cadre du modèle de régression logistique, une quantité intéressante à interpréter en général est le rapport de cotes (« odds ratio »). Le rapport de cotes est une mesure d'association entre deux variables et est égal à 1 en l'absence d'association. Dans le contexte des phénomènes rares (prévalence  $< 0,10$  pour toutes les combinaisons des variables explicatives), le rapport de cotes peut être interprété comme un simple rapport de prévalences (par exemple, le rapport de proportions de puits dont la concentration en nitrates excède 3 mg/L-N entre deux sous-groupes). Dans ce cas-ci, la proportion de puits dont la concentration excède le seuil fixé est globalement d'environ 11 % (et de 6 % pour la proportion de puits avec présence de bactéries), mais est supérieure à ce niveau pour certaines combinaisons des variables explicatives considérées. Le rapport de cotes surestime quelque peu dans ce cas le rapport de prévalences. Dans le contexte de la présente analyse, les estimations obtenues pour ces rapports sont de toute façon très imprécises en général et, par conséquent, de peu d'utilité. Il sera seulement possible de dire si un rapport entre deux sous-groupes est significativement supérieur à 1 ou non (c'est-à-dire si la différence entre les sous-groupes est significative). Des proportions estimées ou prédites d'après le modèle pour les sous-groupes formés par la combinaison des variables explicatives pourront être interprétées sans en estimer le rapport.

Lorsqu'une variable explicative est incluse dans le modèle, on cherche à tester si son effet principal est significativement différent de zéro. Pour pouvoir déterminer si un effet est *statistiquement significatif* ou non, une hypothèse doit tout d'abord être définie.

Exemple 1 : La proportion de puits avec une concentration en nitrates supérieure à 3 mg/L-N est égale pour la zone en surplus et la zone témoin.

Une statistique est définie et calculée et permet d'effectuer le test statistique de cette hypothèse. Ensuite, la probabilité d'obtenir une valeur de la statistique au moins aussi élevée que celle observée si l'hypothèse est effectivement vraie est calculée. Cette probabilité est comparée à une valeur de seuil théorique déjà établie. En pratique, le seuil 0,05 est souvent utilisé. Si la probabilité observée est plus faible que le seuil fixé, la conclusion est que l'hypothèse doit être rejetée.

Exemple 2 : Si le seuil observé du test de l'hypothèse « la proportion de puits avec une concentration en nitrates supérieure ou égale à 3 mg/L-N est égale pour la zone en surplus et la zone témoin » est de 0,02 et que le seuil du test est fixé à 0,05, cette hypothèse est rejetée et il est possible de conclure que l'étude a

permis de détecter une différence significative entre les deux zones quant à la proportion de puits dont la concentration en nitrates excède le seuil de 3 mg/L-N.

Une variable explicative peut avoir aussi un effet confondant. Les termes « effet confondant » sont utilisés pour décrire une variable explicative qui est associée à la fois à la variable réponse et à une variable explicative d'intérêt. Il est possible de déterminer si une variable explicative  $X$  a un effet confondant en comparant les coefficients estimés de la variable explicative d'intérêt avec et sans la variable  $X$  dans le modèle. Si les coefficients estimés ont subi un changement important, cela indique que la variable  $X$  devrait être incluse dans le modèle, peu importe si elle a ou non un effet significatif.

Exemple 3 : La variable « type de puits » a un effet confondant. De fait, elle est associée à la concentration en nitrates au-dessus du seuil et elle est associée à la variable explicative « strate ». On remarque que les coefficients estimés de la variable « strate » sont modifiés de façon importante selon que la variable « type de puits » est incluse ou non dans le modèle.

Un examen des données peut être effectué afin d'évaluer si celles-ci suggèrent un effet confondant de la part de certaines variables. Prenons un exemple dans le cadre de l'étude sur la caractérisation (données réelles).

**Tableau 1** Probabilité estimée<sup>4</sup> de trouver des nitrates à partir du seuil de 3 mg/L-N pour l'étude de la caractérisation (sept bassins versants)

	Zone témoin	Zone en surplus	Rapport de cotes
Captage	5 %	17 %	3,9
Puits de surface	7 %	25 %	4,4
Puits profond	2 %	9 %	4,8
<b>TOTAL</b>	<b>4 %</b>	<b>13 %</b>	<b>3,6</b>

Si la variable « type de puits » n'a pas un effet confondant, on s'attend à ce que le rapport de cotes par type de puits soit à peu près constant et qu'il ait approximativement la même valeur que le rapport de cotes total. De fait, il a été mentionné que l'effet confondant d'une variable explicative modifie les coefficients estimés d'une autre variable explicative dans le modèle. Donc, si les coefficients estimés d'une variable explicative sont affectés par l'inclusion d'une autre variable explicative qui cause un effet confondant, le rapport de cotes le sera aussi puisqu'il est calculé à partir des coefficients estimés.

On remarque que le rapport de cotes<sup>5</sup> est à peu près constant selon le type de puits (3,9 à 4,8). On note aussi que le rapport de cotes est plus faible au global (3,6). Ainsi, lorsque le type de puits est considéré dans l'analyse, l'écart entre la proportion de puits avec une concentration en nitrates au-dessus du seuil de 3,0 mg/L-N pour la zone témoin et la zone en surplus est augmenté. Ce résultat suggère que la variable « type de puits » a un effet confondant.

4. Correspond au terme  $p_i$  estimé à partir du modèle.

5. On peut interpréter le rapport de cotes comme un rapport de probabilités (ou proportions) estimées lorsque la proportion de puits avec une concentration en nitrates à partir du seuil de 3,0 mg/L-N est petite.

**Tableau 2 Répartition pondérée des puits de l'étude de la caractérisation  
(sept bassins versants)**

	<b>Zone témoin</b>	<b>Zone en surplus</b>
Captage	3 %	2 %
Puits de surface	43 %	24 %
Puits profond	54 %	74 %
<b>TOTAL</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

De plus, la répartition pondérée du nombre de puits dans la population visée pour l'étude de la caractérisation montre que la proportion de puits en zone témoin et en zone de surplus varie selon le type de puits. Ceci est particulièrement vrai pour les puits de surface et les puits profonds. Puisque les rapports de cote étaient à peu près constants selon le type de puits, c'est la répartition différente entre les deux zones qui fait en sorte que le rapport de cotes global diffère.

Ainsi, lorsqu'une variable explicative dont on veut tenir compte a un effet confondant, il est important de l'inclure dans le modèle afin que les coefficients estimés ne soient pas biaisés.

Le logiciel statistique SUDAAN a été utilisé pour effectuer la modélisation des deux variables réponses. Ce logiciel tient compte du plan de sondage dans l'estimation des paramètres  $\beta_k$  (ainsi que de leur variance) à l'aide de la pondération. Cela permet d'obtenir des estimations non biaisées et d'inférer les conclusions à l'ensemble de la population visée. Puisque les bâtiments ont été sélectionnés avec probabilités égales au sein des strates, cela équivaut à sélectionner des puits avec probabilités proportionnelles au nombre de bâtiments par ferme. Puisque le taux d'échantillonnage des puits est faible, il est possible de supposer que les puits ont été sélectionnés avec remise, ce qui simplifie l'estimation de la variance des coefficients. Un résultat est dit significatif lorsque le seuil observé est inférieur à 0,05.

### 3 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS POUR L'ANALYSE DE LA CONCENTRATION EN NITRATES

#### 3.1 VARIABLES CONSIDÉRÉES

Ce modèle étudie la concentration en nitrates qui excède le seuil de 3 mg/L-N dans l'eau du puits échantillonnée. La variable réponse prend deux modalités :

- a) la concentration en nitrates est supérieure ou égale à 3 mg/L-N;
- b) la concentration en nitrates est inférieure à 3 mg/L-N.

De plus, la variable explicative principale sera étudiée de deux façons. Dans un premier temps, nous considérerons l'ensemble de la zone en surplus de fumier comparativement à la zone témoin. Dans un second temps, nous considérerons une variable à huit modalités correspondant aux strates d'échantillonnage, soit sept bassins versants en surplus de fumier et une zone témoin. Aux fins de l'analyse, elle est considérée dans son ensemble, sous l'hypothèse que la proportion de puits dont la concentration en nitrates excède le seuil est homogène au sein de la zone.

On s'intéresse également à l'étude de la relation entre la concentration en nitrates et la zone en contrôlant pour certaines autres variables potentiellement liées à la concentration en nitrates, telles que le type de puits, la présence ou l'absence d'activité agricole, entre autres. Voici les variables explicatives considérées :

- la zone (en surplus ou témoin);
- la strate d'échantillonnage (sept bassins versants en surplus et un regroupement de bassins en zone témoin);
- le type de puits;
- l'absence ou la présence d'activité agricole;
- le type d'installation septique;
- la distance entre le puits et l'installation septique;
- le type de site d'entreposage de fumier;
- la distance entre le puits et le site d'entreposage de fumier.

Il est toujours utile, avant de procéder à la modélisation, d'effectuer quelques analyses préliminaires afin d'explorer les données. Ces analyses aident à détecter des variables qui devraient être incluses au modèle ainsi que des problèmes potentiels.

Tout d'abord, une variable présente une majorité de valeurs manquantes : c'est celle qui définit la distance entre le puits et le site d'entreposage de fumier. Il a été décidé de ne pas l'inclure dans le modèle, car cela enlèverait un grand nombre d'observations pour l'analyse.

Par ailleurs, la variable définissant le type de site d'entreposage de fumier comporte une proportion de valeurs manquantes de l'ordre de 30 %. Son inclusion dans le modèle pourrait entraîner des biais dans les estimations des paramètres (et donc fausser les conclusions) s'il s'avérait que le profil des puits pour lesquels le type de site d'entreposage est connu diffère de celui des autres puits. En particulier, la proportion de puits dont la concentration excède le seuil est significativement supérieure ( $p=0,02$ ) pour le sous-groupe des puits dont le type de site d'entreposage est connu. Cette variable a été incluse au modèle de façon exploratoire, mais ne semblait pas liée significativement à la concentration de nitrates. Elle a par conséquent été retirée en premier lieu du modèle de manière à maximiser le nombre d'observations pour l'ajustement du modèle.

Un problème peut survenir lorsque très peu (ou pas) de puits se trouvent dans une modalité de la variable explicative. Il serait problématique d'inclure une telle variable dans le modèle, car l'estimation du

paramètre correspondant ne serait pas possible (et son effet ne pourrait être évalué). La variable « type d'installation septique » présentait ce type de problème. Certaines de ses modalités ont été regroupées. Elles ont été regroupées de la façon suivante :

- 1- Puisard
- 2- Réservoir scellé
- 3- Fosse septique avec champ d'épuration
- 4- Autres valeurs regroupées

Quant à la variable qui définit la distance entre le puits et le type d'installation septique, elle est numérique et continue (par opposition à une variable catégorique, par exemple le type de puits). Lorsqu'une telle variable est incluse dans le modèle, on doit vérifier s'il existe une relation linéaire entre elle et la fonction logit de la proportion de puits dont la concentration en nitrates excède 3 mg/L-N. Cela constitue une des hypothèses statistiques sous-jacentes à l'utilisation du modèle. Les analyses effectuées afin de vérifier cette hypothèse semblaient indiquer que la relation n'était pas linéaire et que la variable définissant la distance pourrait être divisée en trois catégories correspondant à trois niveaux de proportion de puits dont la concentration excède le seuil. Il a donc été décidé de regrouper les valeurs de la distance entre le puits et le type d'installation septique en trois catégories : distance de 0 à 10 mètres; de plus de 10 mètres à 100 mètres; plus de 100 mètres.

### 3.2 ANALYSES EXPLORATOIRES

L'association existant entre une variable explicative et la variable réponse (nitrates au-dessus d'un certain seuil) peut être étudiée afin de se faire une idée des liens avec les variables explicatives potentielles. La relation entre la variable réponse et chacune des variables explicatives examinées a d'abord été analysée de façon bivariable. Il en ressort qu'il n'y a que les variables zone (et strate) et type de puits pour lesquelles un lien significatif est détecté, au seuil 0,05, avec la concentration en nitrates dichotomisée. Dans tous les autres cas, le seuil observé est supérieur à 0,17.

### 3.3 MODÈLE INCLUANT LA ZONE COMME VARIABLE EXPLICATIVE

Un premier modèle comprenant l'ensemble des variables explicatives retenues a été ajusté aux données. La variable zone a été incluse (sauf la variable strate) pour comparer la zone en surplus de fumier et la zone témoin. Les variables explicatives ne présentant pas de lien significatif avec la concentration en nitrates dichotomisée ont été exclues une à une du modèle, en commençant par la variable « type de site d'entreposage de fumier » pour laquelle beaucoup de valeurs manquantes étaient observées.

Le modèle final est donc :

Modèle 1 : zone et type de puits

Les seuils observés de ces variables sont :

- ❖ Zone : 0,0001 (lié significativement)
- ❖ Type de puits : < 0,0001 (lié significativement)

Le nombre d'observations utilisé pour l'analyse est de 1 200.

### 3.4 MODÈLE INCLUANT LA STRATE D'ÉCHANTILLONNAGE COMME VARIABLE EXPLICATIVE

Un deuxième modèle comprenant l'ensemble des variables explicatives retenues a été ajusté aux données (sauf la variable zone). La variable strate a été incluse pour comparer la zone en surplus de fumier et la zone témoin. Ce modèle compare la zone en surplus d'un bassin versant donné à la zone témoin considérée dans son ensemble. Le test global pour cette variable indique s'il y a une différence significative entre la zone en surplus et la zone témoin pour au moins un des bassins versants. Des tests de comparaison sont également faits séparément pour chacun des bassins. La même stratégie de modélisation que pour le modèle précédent a été utilisée.

Le modèle final est donc :

Modèle 2 : strate et type de puits

Les seuils observés de ces variables sont :

- ❖ Strate : 0,0007 (lié significativement)
- ❖ Type de puits : < 0,0001 (lié significativement)

Le nombre d'observations utilisé pour l'analyse est de 1 200.

### 3.5 INTERPRÉTATION DES MODÈLES RETENUS

#### 3.5.1 Modèle incluant la zone comme variable explicative

On note que la proportion de puits dont la concentration excède le seuil est plus élevée pour les puits de surface que pour les puits en profondeur. De plus, le fait de tenir compte du type de puits dans le modèle creuse l'écart entre la zone en surplus et témoin (effet confondant). Cela est dû à une proportion plus grande de puits en surface dans la zone témoin.

Le tableau suivant présente les probabilités prédites ( $p_i$ ) par le modèle pour chacune des combinaisons des variables explicatives :

**Tableau 3** Probabilité prédite de trouver un puits dont la concentration en nitrates excède le seuil de 3 mg/L-N selon la zone et le type de puits

Zone	Type de puits		
	En profondeur	En surface	De captage
Surplus	0,09	0,25	0,17
Témoin	0,02	0,07	0,05

#### 3.5.2 Modèle incluant la strate d'échantillonnage comme variable explicative

Une fois enlevé l'effet du type de puits, les différences entre la zone en surplus et la zone témoin sont significatives pour tous les bassins versants, à l'exception du bassin L'Assomption.

Comme pour le modèle précédent, on note que la proportion de puits dont la concentration excède le seuil est plus élevée pour les puits de surface que pour les puits en profondeur. De plus, le fait de tenir compte

du type de puits dans le modèle creuse l'écart entre les zones en surplus et la zone témoin pour tous les bassins versants (effet confondant).

La stabilité des résultats d'un bassin versant à l'autre, soit la différence significative observée entre les zones pour sept des huit bassins et l'accroissement de cet écart pour l'ensemble des bassins lorsque l'effet du type de puits est enlevé, vient appuyer le résultat selon lequel il y a une différence entre les zones en surplus et la zone témoin.

Le tableau suivant présente les probabilités prédites ( $p_i$ ) par le modèle pour chacune des combinaisons des variables explicatives :

**Tableau 4 Probabilité prédite de trouver un puits dont la concentration en nitrates excède le seuil de 3 mg/L-N selon la strate et le type de puits**

Strate	Type de puits		
	En profondeur	En surface	De captage
Nicolet (surplus)	0,09	0,27	0,15
Yamaska (surplus)	0,07	0,22	0,11
L'Assomption (surplus)	0,04	0,14	--
Bayonne (surplus)	0,19	0,46	--
Boyer (surplus)	0,24	0,54	--
Etchemin (surplus)	0,13	0,36	0,21
Chaudière (surplus)	0,10	0,30	0,17
Zone témoin	0,02	0,07	0,04

Note : Lorsque la cellule contient « -- », c'est que la probabilité n'a pu être estimée faute de données disponibles.

## 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS POUR L'ANALYSE DE LA PRÉSENCE DE BACTÉRIES

### 4.1 VARIABLES CONSIDÉRÉES

Ce modèle étudie la présence ou l'absence de bactéries dans l'eau du puits échantillonnée. La variable réponse prend deux modalités :

- a) au moins une bactérie présente (*E. coli* ou entérocoques);
- b) aucune bactérie (ni *E. coli*, ni entérocoques).

Parmi les variables explicatives considérées, il y a :

- la zone (en surplus ou témoin);
- la strate d'échantillonnage (sept bassins versants en surplus et un regroupement de bassins en zone témoin);
- le type de puits;
- l'absence ou la présence d'activité agricole;
- le type d'installation septique;
- la distance entre le puits et l'installation septique;
- le type de site d'entreposage de fumier;
- la distance entre le puits et le site d'entreposage de fumier.

Aux fins de l'analyse, la zone témoin est prise dans son ensemble, selon l'hypothèse que la proportion de puits avec présence de bactéries est homogène au sein de la zone.

Il est toujours utile, avant de procéder à la modélisation, d'effectuer quelques analyses préliminaires afin d'explorer les données. Ces analyses peuvent aider à détecter des variables qui devraient être incluses au modèle ainsi que des problèmes potentiels.

Tout d'abord, une variable présente une majorité de valeurs manquantes : c'est celle qui définit la distance entre le puits et le site d'entreposage de fumier. Il a été décidé de ne pas inclure cette variable dans le modèle car cela enlèverait un grand nombre d'observations pour l'analyse.

Un problème peut survenir lorsque très peu de puits se trouvent dans une modalité de la variable explicative. Il serait alors problématique d'inclure une telle variable dans le modèle, car l'estimation du paramètre correspondant ne serait pas possible (et son lien ne pourrait être évalué). La variable «type d'installation septique» présentait ce genre de problème. Certaines de ses modalités ont donc été regroupées, comme cela avait été fait lors de l'élaboration du modèle analysant la concentration en nitrates. Les modalités de cette variable ont été regroupées de la façon suivante :

- 1- Puisard
- 2- Réservoir scellé
- 3- Fosse septique avec champ d'épuration
- 4- Autres valeurs regroupées

Par ailleurs, la variable définissant le type de site d'entreposage de fumier comporte une proportion de valeurs manquantes de l'ordre de 30 %. L'inclusion de cette variable dans le modèle pourrait entraîner des biais dans les estimations des paramètres (et donc fausser les conclusions) s'il s'avérait que le profil des puits pour lesquels le type de site d'entreposage est connu diffère de celui des autres puits. Il semble que, peu importe si la valeur du type de site d'entreposage de fumier soit connue ou non, la proportion de puits avec présence de bactéries est approximativement la même. Cela suggère que le profil des puits, par rapport à la présence de bactéries, est semblable (que le type de site d'entreposage de fumier soit connu ou non). Cette variable a été incluse au modèle de façon exploratoire et semblait être liée significativement à

la présence de bactéries. Elle a par conséquent été incluse dans le modèle. De plus, très peu de puits se trouvent dans certaines modalités de la variable explicative. Une variable regroupée a ainsi été créée pour l'analyse :

- 1- Fosse
- 2- Plate-forme
- 3- Réservoir en sol
- 4- Tous les types d'amas
- 5- Aucun

Dans la strate définissant le bassin versant de la Bayonne en zone de surplus, il n'y avait aucun puits avec présence de bactéries. Cela cause un problème lorsque l'on veut étudier la présence de bactéries et inclure la variable de strate puisque l'estimation n'est pas possible. La solution a été de sélectionner aléatoirement un puits dans la strate du bassin versant de la Bayonne et de lui assigner la valeur de présence de bactéries (au lieu d'absence). Ainsi, le nombre d'observations reste le même et l'analyse par strate est possible. La distribution pondérée globale avant et après cette modification, quant à la variable présence ou absence de bactéries, est approximativement la même.

Quant à la variable qui définit la distance entre le puits et le type d'installation septique, elle a aussi été regroupée en trois catégories : distance de 0 à 10 mètres; de plus de 10 mètres à 100 mètres; plus de 100 mètres. C'est le même regroupement que celui effectué lors de l'élaboration du modèle étudiant la concentration en nitrates.

## **4.2 ANALYSES EXPLORATOIRES**

L'association existant entre une variable explicative et la variable réponse (présence de bactéries) peut être étudiée afin de se faire une idée des liens avec les variables explicatives potentielles. La relation entre la variable réponse et chacune des variables explicatives considérées a d'abord été étudiée de façon bivariée. Il en ressort que, pour les variables type de puits, distance entre le puits et l'installation septique et type de site d'entreposage de fumier, un lien significatif est détecté, au seuil 0,05, avec la présence de bactéries dans l'eau du puits. Quant à l'activité agricole, le seuil observé est de 0,065 (très près du seuil). Dans tous les autres cas, le seuil observé est supérieur à 0,12.

## **4.3 MODÈLE INCLUANT LA ZONE COMME VARIABLE EXPLICATIVE**

### **4.3.1 Ensemble des variables**

Un premier modèle comprenant l'ensemble des variables explicatives retenues a été ajusté aux données. La variable zone a été incluse (sauf la variable strate) pour comparer la zone en surplus de fumier et la zone témoin.

Modèle 1: zone, type de puits, activité agricole, type d'installation septique, distance entre le puits et l'installation septique et type de site d'entreposage de fumier.

Deux variables ont un lien significatif lorsqu'elles sont incluses dans le modèle : type de puits et type de site d'entreposage de fumier. Les quatre autres variables, c'est-à-dire zone, activité agricole, distance entre le puits et l'installation septique et type d'installation septique, ne présentent pas de lien significatif avec la variable réponse. Aucun terme d'interaction ne peut être ajouté au modèle. En effet, l'introduction d'un tel terme cause des problèmes d'estimation en raison de la faible proportion de puits avec présence de bactéries. On doit donc présumer qu'il n'existe pas d'interaction entre les variables explicatives du modèle.

### 4.3.2 Exclusion de la distance entre le puits et l'installation septique et le type d'installation septique

Les variables de distance entre le puits et l'installation septique et le type d'installation septique ont été retirées du modèle puisqu'elles ne présentent pas de lien significatif avec la présence de bactéries dans le puits.

Modèle 2 : zone, type de puits, activité agricole et type de site d'entreposage de fumier.

Ces exclusions n'ont pas modifié les conclusions des quatre autres variables du modèle 1, quant à leur lien significatif ou non avec la variable réponse. De plus, ces variables ne semblaient pas avoir un effet confondant puisque les coefficients estimés du modèle n'ont pas varié grandement<sup>6</sup>.

### 4.3.3 Examen du type de site d'entreposage de fumier

La variable décrivant le type de site d'entreposage de fumier est encore incluse dans le modèle à cette étape. Cependant, rappelons qu'elle comportait une grande proportion de valeurs manquantes et que son inclusion dans le modèle fait en sorte que l'analyse est effectuée à partir d'un sous-ensemble de données. Ainsi, la variable du type de site d'entreposage de fumier a été exclue du modèle, afin d'évaluer si les conclusions des autres variables explicatives du modèle (zone, type de puits et activité agricole) changent.

Modèle 3<sup>7</sup> : zone, type de puits, activité agricole.

Effectivement, il semble qu'un lien significatif soit détecté entre l'activité agricole et la présence de bactéries dans le puits lorsque le type de site d'entreposage de fumier est retiré du modèle. Il est donc possible de s'interroger sur deux points.

- a) Est-ce que l'analyse effectuée sur un sous-ensemble des données (pour lesquelles le type de site d'entreposage de fumier est connu) peut amener une modification des conclusions?
- b) Est-ce que le type de site d'entreposage de fumier a un effet confondant sur l'activité agricole?

Pour répondre à la question a), un autre modèle a été créé. C'est le même que le modèle 3 de la section 4.3.3, mais pour le sous-ensemble de données dont le type de site d'entreposage de fumier est connu.

Modèle 4<sup>8</sup> : zone, type de puits, activité agricole.

Pour ce nouveau modèle, le type de puits a toujours un lien significatif. Quant à l'activité agricole, on remarque que le seuil observé du test est de 0,0597 (comparativement à 0,0072 pour le modèle 3 et est très près du seuil fixé (0,05). Cependant, on pouvait s'attendre à ce que le seuil observé du test augmente lorsque l'analyse est effectuée sur un nombre plus faible d'observations. Ainsi, le fait de travailler avec le sous-ensemble des données dont le type de site d'entreposage est connu n'explique pas à lui seul le changement de conclusion quant à la variable activité agricole. Un léger changement du coefficient estimé de la variable activité agricole entre les deux modèles est observé.

Quant à la question b), les coefficients estimés pour le modèle 2 de la section 4.3.2, c'est-à-dire zone, type de puits, activité agricole et type de site d'entreposage de fumier, et le modèle 4 ont été comparés. Il semble que les coefficients estimés soient modifiés de façon non négligeable pour la variable activité agricole. Comme l'analyse de ces deux modèles se fait à partir du même nombre d'observations approximativement, cela suggère qu'il y a un effet confondant du type de site d'entreposage de fumier sur l'activité agricole. De plus, on remarque que, lorsque l'on tient compte du type de site d'entreposage de

---

6. L'examen des coefficients estimés s'est fait en tenant compte également de la variabilité associée à cette estimation.

7. L'analyse de ce modèle est effectuée peu importe si la valeur du type de site d'entreposage de fumier est connue ou non.

8. L'analyse de ce modèle est effectuée seulement lorsque la valeur du type de site d'entreposage de fumier est connue.

fumier, l'écart entre les puits avec présence d'activité agricole (comparativement à ceux avec absence d'activité agricole) diminue.

En conclusion, le fait d'inclure la variable type de site d'entreposage de fumier fait en sorte que l'analyse est effectuée à partir d'un sous-ensemble d'observations. Il semble que cette inclusion ne modifie pas les conclusions à propos des liens des variables zone et type de puits avec la présence de bactéries. Cependant, le type de site d'entreposage de fumier aurait un effet confondant sur l'activité agricole, ce qui justifie l'inclusion de cette première dans le modèle. De plus, l'effet de l'utilisation de ce sous-ensemble de données pour l'analyse du modèle sur le changement de conclusion de la variable activité agricole est considéré comme négligeable, par rapport à l'effet confondant du type de site d'entreposage de fumier sur l'activité agricole. Donc, il est possible de conclure que la variable type de site d'entreposage de fumier doit demeurer dans le modèle, mais qu'il existe de légers risques de biais causés par la perte d'observations.

#### **4.3.4 Exclusion de l'activité agricole**

Comme il a été décidé à l'étape précédente, la variable décrivant le type de site d'entreposage de fumier est incluse dans le modèle. On revient donc au modèle 2 ayant comme variables explicatives les suivantes : zone, type de puits, activité agricole et type de site d'entreposage de fumier. On avait cependant noté que l'activité agricole n'avait pas de lien significatif avec la présence de bactéries dans l'eau du puits, lorsque l'on tenait compte des autres variables explicatives du modèle. Cette variable a donc été retirée du modèle. Cela n'a pas modifié les conclusions des trois autres variables du modèle (voir section 4.3.2).

Le modèle final est donc :

Modèle 5 : zone, type de puits et type de site d'entreposage de fumier.

Les seuils observés de ces variables sont :

- ❖ Zone : 0,7162 (lié non significativement)
- ❖ Type de puits : 0,0017 (lié significativement)
- ❖ Type de site d'entreposage de fumier : 0,0078 (lié significativement)

Le nombre d'observations utilisé pour l'analyse est de 845.

Ainsi, peu importe les modèles examinés à la section 4.3, il n'est pas possible de détecter un écart entre la zone en surplus et la zone témoin.

### **4.4 MODÈLE INCLUANT LA STRATE D'ÉCHANTILLONNAGE COMME VARIABLE EXPLICATIVE**

#### **4.4.1 Ensemble des variables**

Un deuxième modèle comprenant l'ensemble des variables explicatives retenues a été ajusté aux données (sauf la variable zone). La variable strate a été incluse pour comparer la zone en surplus de fumier et la zone témoin.

Modèle 6 : strate, type de puits, activité agricole, type d'installation septique, distance entre le puits et l'installation septique et type de site d'entreposage de fumier.

Ce modèle permet de comparer la zone en surplus d'un bassin versant donné à la zone témoin prise dans son ensemble. Le test global pour cette variable indique s'il y a une différence significative entre la zone en surplus et la zone témoin pour au moins un des bassins versants. Des tests de comparaison sont

également faits séparément pour chacun des bassins. La même stratégie de modélisation que pour le modèle précédent a été utilisée. Deux variables ont un lien significatif lorsqu'elles sont incluses dans le modèle type de puits et type de site d'entreposage de fumier. Les quatre autres variables, c'est-à-dire strate, activité agricole, distance entre le puits et l'installation septique et type d'installation septique, ne présentent pas de lien significatif avec la variable réponse. Tel que décrit à la section 4.3.1, on doit aussi présumer qu'il n'existe pas d'interaction entre les variables explicatives du modèle.

#### **4.4.2 Exclusion de la distance entre le puits et l'installation septique et le type d'installation septique**

Les variables de distance entre le puits et l'installation septique et le type d'installation septique ont été retirées du modèle puisqu'elles ne présentent pas de lien significatif avec la présence de bactéries dans le puits.

Modèle 7: strate, type de puits, activité agricole et type de site d'entreposage de fumier.

Ces exclusions n'ont pas modifié les conclusions des quatre autres variables du modèle 6 (voir section 4.4.1). D'ailleurs elles ne semblaient pas avoir un effet confondant puisque les coefficients estimés du modèle n'ont pas varié grandement.

#### **4.4.3 Examen du type de site d'entreposage de fumier**

La variable décrivant le type de site d'entreposage de fumier est encore incluse dans le modèle à cette étape. Cependant, rappelons qu'elle comportait une grande proportion de valeurs manquantes. Ainsi, la variable du type de site d'entreposage de fumier a été exclue du modèle, afin d'évaluer si les conclusions des autres variables explicatives du modèle (strate, type de puits et activité agricole) changent.

Modèle 8<sup>9</sup> : strate, type de puits, activité agricole.

Cette fois encore, le lien entre l'activité agricole et la présence de bactéries devient significatif. La même procédure que celle décrite à la section 4.3.3 a été utilisée afin de comprendre ce qui a causé ce changement. Pour répondre à la question a), un autre modèle a été créé. C'est le même que le modèle 8, mais pour le sous-ensemble de données dont le type de site d'entreposage de fumier est connu.

Modèle 9<sup>10</sup> : strate, type de puits, activité agricole.

Pour ce nouveau modèle, le type de puits a toujours un lien significatif. Quant à l'activité agricole, on remarque que le seuil observé du test est de 0,0841 (comparativement à 0,0047 pour le modèle 8). Cependant, on pouvait s'attendre à ce que le seuil observé du test augmente lorsque l'analyse est effectuée sur un nombre plus faible d'observations. Ainsi, le fait de travailler avec le sous-ensemble des données dont le type de site d'entreposage est connu n'explique pas à lui seul le changement de conclusion quant à la variable activité agricole. Un léger changement du coefficient estimé de la variable activité agricole entre les deux modèles est observé.

Quant à la question b), les coefficients estimés de modèle 7, c'est-à-dire strate, type de puits, activité agricole et type de site d'entreposage de fumier, et le modèle 9 ont été comparés. Il semble que les coefficients estimés soient modifiés de façon non négligeable pour la variable activité agricole. Comme l'analyse de ces deux modèles se fait approximativement à partir du même nombre d'observations, cela suggère qu'il y a un effet confondant du type de site d'entreposage de fumier sur l'activité agricole. De

---

9. L'analyse de ce modèle est effectuée peu importe si la valeur du type de site d'entreposage de fumier est connue ou non.

10. L'analyse de ce modèle est effectuée seulement lorsque la valeur du type de site d'entreposage de fumier est connue.

plus, on remarque que lorsque l'on tient compte du type de site d'entreposage de fumier, l'écart entre les puits avec présence d'activité agricole (comparativement à ceux avec absence d'activité agricole) diminue.

Donc, il est possible de conclure également que la variable type de site d'entreposage de fumier doit demeurer dans le modèle, mais il existe de légers risques de biais causés par la perte d'observations.

#### **4.4.4 Exclusion de l'activité agricole**

Comme il a été décidé à l'étape précédente, la variable décrivant le type de site d'entreposage de fumier est incluse dans le modèle. On revient donc au modèle 7 ayant comme variables explicatives les suivantes : strate, type de puits, activité agricole et type de site d'entreposage de fumier. On avait cependant noté que l'activité agricole n'avait pas de lien significatif avec la présence de bactéries dans l'eau du puits, lorsque l'on tenait compte des autres variables explicatives du modèle. Cette variable a donc été retirée du modèle. Cela n'a pas modifié les conclusions des trois autres variables du modèle (voir section 4.4.2).

Le modèle final est donc :

Modèle 10 : strate, type de puits et type de site d'entreposage de fumier.

Les seuils observés de ces variables sont :

- ❖ Strate : 0,5288 (lié non significativement)
- ❖ Type de puits : 0,0021 (lié significativement)
- ❖ Type de site d'entreposage de fumier : 0,0084 (lié significativement)

Le nombre d'observations utilisé pour l'analyse est de 845.

Ainsi, peu importe les modèles examinés à la section 4.4, il n'est pas possible de détecter un écart entre les bassins en zone de surplus et la zone témoin.

## **4.5 INTERPRÉTATION DES MODÈLES RETENUS**

### **4.5.1 Modèle incluant la zone comme variable explicative**

Selon le modèle retenu, il n'a pas été possible de détecter un lien significatif entre la présence de bactéries dans l'eau du puits et la zone en surplus ou non, après avoir enlevé l'effet du type de puits et du type de site d'entreposage de fumier. Puisque la proportion de puits avec présence de bactéries était faible, une plus grande taille d'échantillon aurait peut-être pu permettre de détecter des écarts entre les deux zones. De plus, il semble que ni le type de puits ni le type de site d'entreposage de fumier n'aient un effet confondant sur la zone.

Le tableau suivant présente les probabilités prédites ( $p_i$ ) par le modèle pour chacune des combinaisons des variables explicatives :

**Tableau 5 Probabilité prédite de trouver un puits avec présence de bactéries selon la zone, le type de puits et le type de site d'entreposage de fumier**

Type de site d'entreposage de fumier	Zone	Type de puits		
		En profondeur	En surface	De captage
Fosse	Surplus	0,02	0,06	0,11
	Témoin	0,02	0,05	--
Plate-forme	Surplus	0,13	0,30	0,46
	Témoin	0,11	--	--
Réservoir en sol	Surplus	0,17	0,37	--
	Témoin	0,15	--	--
Tous les types d'amas	Surplus	0,06	0,16	0,28
	Témoin	0,05	0,14	--
Aucun	Surplus	0,03	0,09	0,17
	Témoin	0,03	0,08	0,14

Note : Lorsque la cellule contient « -- », c'est que la probabilité n'a pu être estimée faute de données disponibles.

#### 4.5.2 Modèle incluant la strate d'échantillonnage comme variable explicative

Selon le modèle retenu, il n'a pas été possible de détecter un lien significatif entre la présence de bactéries dans l'eau du puits et la variable de strate, après avoir enlevé l'effet du type de puits et du type de site d'entreposage de fumier. Puisque la proportion de puits avec présence de bactéries était faible, une plus grande taille d'échantillon aurait peut-être pu permettre de détecter des écarts entre la zone en surplus et la zone témoin pour au moins un bassin versant.

Le tableau suivant présente les probabilités prédites ( $p_i$ ) par le modèle pour chacune des combinaisons des variables explicatives :

**Tableau 6 Probabilité prédite de trouver un puits avec présence de bactéries selon la zone et le type de puits, lorsque le type de site d'entreposage est une fosse**

FOSSE	Type de puits		
	En profondeur	En surface	De captage
<b>Strate</b>			
Nicolet (surplus)	0,01	0,03	--
Yamaska (surplus)	0,02	0,06	0,10
L'Assomption (surplus)	0,01	0,03	--
Bayonne (surplus)	--	--	--
Boyer (surplus)	0,06	0,16	--
Etchemin (surplus)	0,02	0,05	0,09
Chaudière (surplus)	0,03	0,08	0,13
Zone témoin	0,01	0,04	--

Note : Lorsque la cellule contient « -- », c'est que la probabilité n'a pu être estimée faute de données disponibles.

**Tableau 7 Probabilité prédite de trouver un puits avec présence de bactéries selon la zone et le type de puits, lorsque le type de site d'entreposage est une plate-forme**

PLATE-FORME	Type de puits		
	En profondeur	En surface	De captage
<b>Strate</b>			
Nicolet (surplus)	0,08	0,21	--
Yamaska (surplus)	0,13	0,30	--
L'Assomption (surplus)	--	--	--
Bayonne (surplus)	--	--	--
Boyer (surplus)	0,32	--	--
Etchemin (surplus)	0,12	0,28	0,41
Chaudière (surplus)	0,17	0,38	--
Zone témoin	0,10	--	--

**Tableau 8 Probabilité prédite de trouver un puits avec présence de bactéries selon la zone et le type de puits, lorsque le type de site d'entreposage est un réservoir en sol**

RÉSERVOIR EN SOL	Type de puits		
	En profondeur	En surface	De captage
<b>Strate</b>			
Nicolet (surplus)	0,12	0,28	--
Yamaska (surplus)	0,18	--	--
L'Assomption (surplus)	--	--	--
Bayonne (surplus)	--	--	--
Boyer (surplus)	--	--	--
Etchemin (surplus)	0,17	--	--
Chaudière (surplus)	0,24	--	--
Zone témoin	0,14	--	--

**Tableau 9 Probabilité prédite de trouver un puits avec présence de bactéries selon la zone et le type de puits, lorsque le type de site d'entreposage est un amas**

TOUS LES TYPES D'AMAS	Type de puits		
	En profondeur	En surface	De captage
<b>Strate</b>			
Nicolet (surplus)	0,04	0,11	0,19
Yamaska (surplus)	0,07	0,17	0,27
L'Assomption (surplus)	0,03	0,09	--
Bayonne (surplus)	0,04	0,12	--
Boyer (surplus)	0,19	--	--
Etchemin (surplus)	0,06	0,16	0,26
Chaudière (surplus)	0,09	0,23	0,35
Zone témoin	0,05	0,14	--

**Tableau 10** Probabilité prédite de trouver un puits avec présence de bactéries selon la zone et le type de puits, lorsqu'il n'y a aucun site d'entreposage de fumier

AUCUN	Type de puits		
	En profondeur	En surface	De captage
<b>Strate</b>			
Nicolet (surplus)	0,02	0,06	0,11
Yamaska (surplus)	0,04	0,10	--
L'Assomption (surplus)	0,02	0,05	--
Bayonne (surplus)	0,02	0,07	--
Boyer (surplus)	0,11	--	--
Etchemin (surplus)	0,03	0,09	0,16
Chaudière (surplus)	0,05	0,14	0,22
Zone témoin	0,03	0,08	0,13



## 5 MISES EN GARDE

Les modèles de régression logistique qui ont été présentés ont été élaborés à partir d'un sous-ensemble de variables explicatives considérées comme importantes pour l'analyse. Cependant, il est possible qu'une (ou plusieurs) variable additionnelle non mesurée présente un lien significatif avec la variable réponse, par exemple : certaines caractéristiques du milieu, le niveau de fiabilité des puits, etc. Il y a alors possibilité de biais dans les estimations. Autrement dit, le fait de tenir compte ou non de cette variable additionnelle entraîne des conclusions différentes quant à la relation entre la variable dépendante et les variables explicatives considérées.

S'il y a présence d'interaction significative entre la variable additionnelle et une autre variable explicative du modèle (comme la zone), alors le lien étudié varie selon la valeur prise par la variable additionnelle. Il est également possible que cette variable additionnelle ait un effet confondant sur le lien entre une variable réponse et une autre variable explicative, en particulier la zone. En l'absence de données pour une telle variable additionnelle, on doit faire l'hypothèse que la proportion de puits selon les modalités de cette variable est semblable au sein des zones en surplus et témoin. Présument que la variable réponse est liée à cette variable additionnelle, un écart dans la répartition de celle-ci entre les deux zones entraînerait un biais dans les estimations. C'est donc dire que l'on sous-estimerait ou surestimerait, selon le cas, le rapport des proportions de puits pour la variable réponse entre les zones en surplus et témoin. S'il s'avérait que la zone témoin présentait, en moyenne, des valeurs pour la variable additionnelle inférieure à celles de la zone en surplus, le fait de tenir compte de cette variable additionnelle dans la comparaison aurait pour effet d'amoinrir les écarts observés. C'est donc dire que, si l'on ne tient pas compte d'une telle variable additionnelle, **on pourrait déclarer significative une différence qui ne serait pas réelle au sein de la population des puits à l'étude**. De plus, lorsqu'une variable importante est omise du modèle, l'interprétation des résultats doit en tenir compte. Par exemple, si une caractéristique du milieu a un effet confondant sur la variable zone mais qu'elle n'est pas incluse au modèle, la différence observée entre la zone agricole et la zone témoin n'est pas dissociable du fait que les deux zones diffèrent selon cette caractéristique. L'écart observé reflète alors un « effet » confondu de la zone et de cette caractéristique et ne peut être attribué qu'au fait de se trouver en zone agricole ou en zone témoin. C'est le problème le plus important qui se pose.

Un deuxième problème pouvant survenir est lorsqu'il y a une hétérogénéité de la proportion de puits pour la variable réponse au sein d'une combinaison des variables explicatives. Par exemple, cette proportion pourrait varier géographiquement (au sein d'une combinaison donnée). Cela va à l'encontre de l'hypothèse d'homogénéité sur laquelle repose le modèle de régression logistique. Dans ce cas, même en l'absence de biais dans les estimations, la variance associée aux paramètres du modèle est sous-estimée, de même que les seuils observés des tests. **On pourrait ainsi, à tort, déclarer significative la différence observée entre la zone en surplus et la zone témoin, alors que cette différence n'existe pas au sein de la population.**

Une dernière mise en garde vise à rappeler que la sélection des puits s'est effectuée selon une procédure de remplacement des puits non répondants (jusqu'à trois remplacements). Ainsi, il a fallu supposer que le puits répondant avait les mêmes caractéristiques que le puits initialement sélectionné, sauf si ce dernier était inadmissible. S'il s'avère que ces puits diffèrent selon certaines caractéristiques, des biais sont alors introduits dans les estimations. Le peu d'informations disponibles à propos des puits sélectionnés n'a pas permis d'analyser ce biais.

## CONCLUSION

En conclusion, les analyses statistiques ont permis de répondre au premier objectif de l'enquête qui était de déterminer s'il y a un lien entre la présence de l'activité agricole et la qualité de l'eau potable de puits, sur l'ensemble du territoire composé des sept bassins versants. Les deux mesures de la qualité de l'eau

potable étudiées (la concentration en nitrates à partir du seuil de 3 mg/L-N et la présence d'au moins une bactérie dans l'échantillon d'eau) ont mené à des conclusions différentes quant à leur lien avec la zone agricole ou non. En ce qui concerne la concentration en nitrates à partir du seuil de 3 mg/L-N, il a été possible de détecter un lien (en tenant compte d'autres variables explicatives) significatif avec la zone (agricole ou non). Cependant, en ce qui concerne la présence de bactéries, il n'a pas été possible de détecter un lien (en tenant compte d'autres variables explicatives) significatif avec la zone (agricole ou non). Pour ce qui est du lien entre ces deux mesures et la strate, les mêmes conclusions que celles mentionnées pour la zone s'appliquent. Il est important de rappeler que l'inférence de ces résultats est limitée aux puits de résidence sur le territoire des sept bassins versants (décrits à la section 1) à l'étude, en tenant compte des mises en garde énoncées précédemment.

## **ANNEXE 3.A**

### **ANALYSES EXPLORATOIRES POUR LE MODÈLE DE LA CONCENTRATION EN NITRATES**



## ANALYSES EXPLORATOIRES POUR LE MODÈLE DE LA CONCENTRATION EN NITRATES

➤ Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Zone	1.00	9.69	0.0019

Explications : Le seuil observé permet de vérifier (en comparant avec le seuil théorique de 0,05) s'il est possible de détecter un lien significatif entre la variable explicative et la variable réponse. Le seuil observé est établi à partir, entre autres, de la statistique du khi-carré de Satterthwaite ( $\chi^2_{SATT}$ ) et du nombre de degrés de liberté.

➤ Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
	5.90	22.45	0.0010

➤ Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Type de puits	2.00	27.96	0.0000

➤ Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Activité agricole	1.00	1.58	0.2084

➤ Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Type de site d'entreposage de fumier	3.80	4.82	0.2816

➤ Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Distance entre le puits et l'installation septique	2.00	3.00	0.2237

➤ Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Type d'installation septique	2.97	4.88	0.1787



## **ANNEXE 3.B**

### **MODÈLE POUR LA CONCENTRATION EN NITRATES (ZONE)**



## MODÈLE POUR LA CONCENTRATION EN NITRATES (ZONE)

Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé		
Zone	1.00	15.35	0.0001		
Type de puits	2.00	33.92	0.0000		
Variab les expli cati ves	Coeff. esti mé	Effet de pl an	Erreur- type	Stat. T du test	Seuil I observé
<b>Ordonnée à l' ori gi ne</b>	-2.52	0.95	0.36	-7.01	0.0000
<b>Zone</b>					
Agri col e	1.45	0.94	0.37	3.92	0.0001
Non agri col e	0.00	.	0.00	.	.
<b>Type de pui ts</b>					
Profond	-1.28	1.37	0.22	-5.73	0.0000
Surface	0.00	.	0.00	.	.
Captage	-0.51	1.30	0.63	-0.81	0.4157

Explications : Le coefficient estimé correspond au paramètre  $\beta$  du modèle de régression logistique. Le seuil observé permet de tester (en comparant avec le seuil théorique de 0,05) l'hypothèse que le paramètre  $\beta$  est égal à 0. Le seuil observé est établi à partir, entre autres, du coefficient estimé et de l'erreur-type.



## **ANNEXE 3.C**

### **MODÈLE POUR LA CONCENTRATION EN NITRATES (STRATE)**



## MODÈLE POUR LA CONCENTRATION EN NITRATES (STRATE)

Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil observé		
Strate	5.77	23.00	0.0007		
Type de puits	2.00	33.85	0.0000		
Variab les expli cati ves	Coeff. esti mé	Effet de pl an	Erreur- type	Stat. T du test	Seuil I observé
<b>Ordonnée à l'origine</b>	-2.51	0.94	0.36	-6.98	0.0000
<b>Strate</b>					
Ni col et	1.51	0.83	0.41	3.66	0.0003
Yamaska	1.23	0.96	0.40	3.04	0.0024
L' Assompti on	0.66	1.72	0.65	1.01	0.3103
Bayonne	2.34	1.03	0.63	3.74	0.0002
Boyer	2.65	0.78	0.60	4.43	0.0000
Etchemi n	1.93	1.01	0.47	4.15	0.0000
Chaudi ère	1.66	1.00	0.41	4.04	0.0001
Témoi n	0.00	.	0.00	.	.
<b>Type de pui ts</b>					
Profond	-1.30	1.22	0.22	-5.88	0.0000
Surface	0.00	.	0.00	.	.
Captage	-0.76	1.27	0.63	-1.21	0.2268



## **ANNEXE 3.D**

### **ANALYSES EXPLORATOIRES POUR LE MODÈLE AVEC PRÉSENCE DE BACTÉRIES**



## ANALYSES EXPLORATOIRES POUR LE MODÈLE AVEC PRÉSENCE DE BACTÉRIES

Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Zone	1.00	0.68	0.4115
Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Strate <sup>11</sup>	6.22	10.33	0.1245
Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Type de puits	1.99	19.05	0.0001
Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Activité agricole	1.00	3.40	0.0654
Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Type de site d'entreposage de fumier	3.97	13.98	0.0074
Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Distance entre le puits et l'installation septique	1.98	7.46	0.0239
Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil I observé
Type d'installation septique	2.99	0.14	0.9864

11. L'analyse bivariée a été effectuée en utilisant la variable réponse modifiée (voir section 4.1).



## **ANNEXE 3.E**

### **MODÈLE POUR LA PRÉSENCE DE BACTÉRIES (ZONE)**



## MODÈLE POUR LA PRÉSENCE DE BACTÉRIES (ZONE)

Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	SeuI observé		
Zone	1.00	0.13	0.7162		
Type de puits	2.00	12.86	0.0017		
Type de site d'entreposage de fumier	3.98	13.90	0.0078		
<b>Variab les expli cati ves</b>	<b>Coeff. esti mé</b>	<b>Effet de plan</b>	<b>Erreur- type</b>	<b>Stat. T du test</b>	<b>SeuI observé</b>
<b>Ordonnée à l'origi ne</b>	-2.48	1.03	0.45	-5.57	0.0000
<b>Zone</b>					
Agri cole	0.18	1.05	0.49	0.36	0.7162
Non agri cole	0.00	.	0.00	.	.
<b>Type de puits</b>					
Profond	-1.03	1.15	0.34	-3.01	0.0027
Surface	0.00	.	0.00	.	.
Captage	0.69	1.13	0.68	1.02	0.3086
<b>Type de si te d'entreposage de fumier</b>					
Fosse	-0.50	1.12	0.48	-1.03	0.3046
Plate-forme	1.43	1.16	0.68	2.09	0.0365
Réservoir en sol	1.77	1.11	0.74	2.39	0.0170
Tous les types d'amas	0.66	1.21	0.39	1.67	0.0952
Aucun	0.00	.	0.00	.	.



## **ANNEXE 3.F**

### **MODÈLE POUR LA PRÉSENCE DE BACTÉRIES (STRATE)**



## MODÈLE POUR LA PRÉSENCE DE BACTÉRIES (STRATE)

Nom de la variable	Degrés de liberté (Satt.)	$\chi^2_{SATT}$	Seuil observé		
Strate	6.19	5.31	0.5288		
Type de puits	2.00	12.36	0.0021		
Type de site d'entreposage de fumier	3.95	13.66	0.0084		
Variables explicatives	Coeff. estimé	Effet de plan	Erreur- type	Stat. T du test	Seuil observé
<b>Ordonnée à l'origine</b>	-2.46	1.02	0.44	-5.54	0.0000
<b>Strate</b>					
Ni col et	-0.21	0.85	0.62	-0.34	0.7343
Yamaska	0.28	1.04	0.56	0.51	0.6099
L' Assompti on	-0.47	1.82	0.93	-0.50	0.6152
Bayonne	-0.18	0.95	1.15	-0.16	0.8726
Boyer	1.44	0.97	0.91	1.59	0.1128
Etchemi n	0.20	0.95	0.66	0.30	0.7617
Chaudi ère	0.63	1.12	0.57	1.10	0.2697
Témoi n	0.00	.	0.00	.	.
<b>Type de puits</b>					
Profond	-1.07	1.10	0.35	-3.07	0.0022
Surface	0.00	.	0.00	.	.
Captage	0.58	1.06	0.68	0.86	0.3888
<b>Type de si te d' entreposage de fumier</b>					
Fosse	-0.66	1.04	0.48	-1.38	0.1684
Pl ate-forme	1.33	1.14	0.69	1.91	0.0562
Réservoir en sol	1.72	1.18	0.79	2.18	0.0293
Tous les types d' amas	0.62	1.20	0.40	1.57	0.1169
Aucun	0.00	.	0.00	.	.



*L'Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé comprend neuf rapports et un sommaire.*

Sommaire

- 1. Méthodologie**
- 2. Caractérisation de l'eau souterraine dans les sept bassins versants**
- 3. Influence de la vulnérabilité des aquifères sur la qualité de l'eau des puits individuels dans la MRC de Montcalm**
- 4. Caractérisation des sources municipales d'approvisionnement en eau potable dans les sept bassins versants en surplus de fumier**
- 5. Étude de la consommation d'eau dans la population adulte**
- 6. Étude de la consommation d'eau chez les nourrissons**
- 7. Étude du risque de gastro-entérite chez les familles utilisant l'eau d'un puits domestique**
- 8. Incidence des maladies entériques potentiellement transmissibles par l'eau : Analyse des hospitalisations et des cas déclarés aux directions de santé publique 1995-1999**
- 9. Évaluation du risque à la santé pour la population exposée aux nitrates présents dans l'eau potable**

