

**Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke**

**Mise au point du Système de cartographie dynamique multiéchelle
(SCDM) pour la caractérisation des eaux souterraines de la zone Nicolet
et de la partie basse de la zone Saint-François**

Thi Kim Dung TRAN

**Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maîtrise ès sciences géographiques (M. Sc.), cheminement Géomatique**

Février 2016

© Thi Kim Dung TRAN, 2016

Résumé

La zone de gestion intégrée de l'eau de la rivière Nicolet et la partie basse de la zone intégrée de l'eau de la rivière Saint-François dans le Centre-du-Québec se trouvent dans un secteur où les eaux souterraines ont fait l'objet récemment d'un projet de recherche dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines (PACES) du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC, 2013).

La diffusion des résultats des projets issus du programme PACES présente des défis très particuliers. Il est nécessaire de synthétiser un grand nombre de données de manière efficace : modèle hydrostratigraphique, topographie, hydrographie, données géologiques sur les unités rocheuses et quaternaires, description des forages, propriétés hydrauliques des matériaux, contexte hydrogéologique, utilisation de l'eau souterraine, qualité de l'eau, activités humaines ayant un impact sur la qualité de l'eau (MDDELCC, 2013). Ce projet de maîtrise tente donc de répondre à la question de recherche suivante : « Comment synthétiser et visualiser clairement les connaissances sur les eaux souterraines ? »

Ce projet de maîtrise a donc été réalisé pour résoudre la problématique de la diffusion des résultats à l'aide du système de cartographie dynamique multiéchelle (SCDM). Il est appliqué tout particulièrement à la zone de gestion intégrée de l'eau de la rivière Nicolet et à la partie basse de la zone intégrée de l'eau de la rivière Saint-François dans le Centre-du-Québec (PACES-NSF). La méthodologie utilisée a été efficace pour développer un système qui permet d'intégrer des données à référence spatiale sur les eaux souterraines et de diffuser visuellement les résultats spécifiques pour ce projet PACES-NSF sur Internet. Le SCDM permet aux acteurs de l'eau et aux gestionnaires du territoire d'avoir une vision régionale sur les informations et les caractéristiques des eaux souterraines. Les logiciels libres et ouverts utilisés dans ce projet ont été des choix appropriés, efficaces et spécialement économiques.

Le SCDM peut être utilisé pour la diffusion des résultats des projets de caractérisation des eaux souterraines des bassins versants de toute la province. Il peut également être adapté à l'étude des eaux de surface.

Mots clés : Eau souterraine, cartographie dynamique multiéchelle, logiciel libre et ouvert

Directeur de recherche : **Prof Goze Bertin Béné** (Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke)

Codirectrice de recherche : **Prof Marie Larocque** (Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, Université de Québec à Montréal)

Membres du jury :

Dr Mickaël Germain, Ph.D. (Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke)

Mme Olga Dupont, M.Sc. (Agence de géomatique du Centre-du-Québec)

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	v
Glossaire et acronymes	vi
Remerciements	vii
1. Introduction	1
1.1. Contexte du projet de recherche.....	1
1.2. Problématique.....	3
1.3. Objectifs.....	4
1.4. Hypothèses.....	5
2. Revue bibliographique	6
2.1. Application SIG sur la gestion des eaux souterraines.....	6
2.2. Atlas de l'eau.....	7
2.3. Cartographie dynamique.....	8
2.4. Les outils libres et ouverts mettant en œuvre la cartographie dynamique.....	12
2.4.1. Les normes internationales.....	12
2.4.2. Les systèmes de gestion de base de données spatiale.....	13
2.4.3. Les serveurs cartographiques.....	14
2.4.4. Les interfaces cartographiques.....	14
3. Méthodologie	16
3.1. Site d'étude.....	16
3.2. Schéma méthodologique.....	17
3.3. Acquisition des données.....	18
3.4. Analyse des besoins.....	19
3.4.1. Identification des besoins.....	19
3.4.1.1. Caractérisation des eaux souterraines.....	20
3.4.1.2. Vision régionale de la ressource en eau souterraine.....	23
3.4.2. Création des listes de questions.....	24
3.4.2.1. Liste des questions no.1.....	24
3.4.2.2. Liste des questions no.2.....	26
3.5. Modélisation spatiale du système.....	27
3.5.1. Classes d'entités.....	27
3.5.2. Sous-classes d'entités.....	28
3.5.3. Entités.....	32
3.5.4. Attributs et sous-attributs.....	33
3.6. Choix de la méthode de développement du SCDM.....	34
3.6.1. Environnement de développement et d'exploitation.....	34
3.6.2. Cartographie dynamique.....	36
3.6.3. Atlas multiéchelle.....	37
4. Résultats	40
4.1. La base de données à référence spatiale.....	40
4.2. L'interface de diffusion cartographie.....	40
4.2.1. La page d'accueil.....	40

4.2.2. Module de cartes thématiques	41
4.2.3. Module de cartes interactives	43
4.2.4. Module d’atlas multiéchelle	46
4.3. Mise en opération du système	50
5. Analyse et discussion des résultats	50
6. Conclusion et recommandations	52
7. Références.....	54
8. Annexes.....	58
8.1. Annexe 1 : Description des livrables de la phase III du projet PACES-NSF	58
8.2. Annexe 2 : Données expérimentales	59
8.3. Annexe 3 : Résumé de l’utilisation de l’eau souterraine.....	61
8.4. Annexe 4 : La liste des entités.....	63
8.5. Annexe 5 : Dépassement de normes de potabilité - Éléments inorganiques.....	65
8.6. Annexe 6 : Dépassement de normes de potabilité – Détection de nitrates	67
8.7. Annexe 7 : Dépassements de normes de potabilité – Bactériologie	69
8.8. Annexe 8 : Dépassements esthétiques.....	71
8.9. Annexe 9 : Détection d’au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2013	76
8.10. Annexe 10 : Détection d’au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2014.....	77
8.11. Annexe 11 : Représentation du « module d’atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau de zone d’étude	78
8.12. Annexe 12 : Représentation du « module d’atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau de municipalité.....	79

Liste des figures

Figure 1 - L'interface utilisateur de CropScape (Han <i>et al.</i> , 2012)	11
Figure 2 - Zone couverte par le projet de connaissances des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François (Larocque <i>et al.</i> , 2013)	16
Figure 3 - Schéma méthodologique de la recherche	18
Figure 4 - Création des listes de questions d'analyse spatiale	24
Figure 5 - Identification des classes d'entités	28
Figure 6 - La sous-classe « Territoire »	28
Figure 7 - La sous-classe « Contextes hydrogéologiques régionaux »	29
Figure 8 - La sous-classe « Conditions hydrogéologiques »	30
Figure 9 - La sous-classe « Activités anthropiques »	31
Figure 10 - La sous-classe « Usage de la ressource »	31
Figure 11 - La sous-classe « Qualité de la ressource »	32
Figure 12 - Un exemple de décomposition des quatre niveaux pour l'entité « Agriculture »	33
Figure 13 - Architecture de trois couches (3-Tiers) pour le développement du SCDM... ..	35
Figure 14 - Schéma de l'atlas multiéchelle	38
Figure 15 - L'indicateur de la qualité de l'eau	39
Figure 16 - La structure de la base de données à référence spatiale	40
Figure 17 - La page d'accueil	41
Figure 18 - Représentation du « module des cartes thématiques » pour l'occupation du sol	42
Figure 19 - Représentation du « module des cartes interactives » pour l'affectation du territoire	43
Figure 20 - Structure de carte multiéchelle pour la zone d'étude	47
Figure 21 - Représentation du « module d'atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau de MRC	49
Figure 22 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère granulaire - Éléments inorganiques	65
Figure 23 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère au roc - Éléments inorganiques	66
Figure 24 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère granulaire - Détection de nitrates	67
Figure 25 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère au roc - Détection de nitrates	68
Figure 26 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère granulaire - Bactériologie	69
Figure 27 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère au roc - Bactériologie	70
Figure 28 - Dépassements esthétiques - Aluminium	72
Figure 29 - Dépassements esthétiques - Chlorures	72
Figure 30 - Dépassements esthétiques - Dureté totale	72
Figure 31 - Dépassements esthétiques - Fer	73
Figure 32 - Dépassements esthétiques - Matières dissoutes totales	73

Figure 33 - Dépassements esthétiques - Manganèse.....	73
Figure 34 - Dépassements esthétiques - Sodium	74
Figure 35 - Dépassements esthétiques - pH.....	74
Figure 36 - Dépassements esthétiques - Sulfates.....	74
Figure 37 - Dépassements esthétiques - Sulfures	75
Figure 38 - Dépassements esthétiques - Température	75
Figure 39 - Détection de pesticides en 2013.....	76
Figure 40 - Détection de PPSP en 2013.....	76
Figure 41 - Détection de pesticides en 2014.....	77
Figure 42 - Détection de PPSP en 2014.....	77
Figure 43 - Représentation du « module d’atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau de zone d’étude.....	78
Figure 44 - Représentation du « module d’atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau de municipalité	79

Liste des tableaux

Tableau 1 - MRC, superficie et population du territoire étudié (Larocque <i>et al.</i> , 2013) ..	17
Tableau 2 - Exemple de décomposition d'une entité en attributs et sous-attributs : l'entité «Agriculture »	34
Tableau 3 - Liste des cartes avec des couches	44
Tableau 4 - Description des livrables de la phase III du projet PACES-NSF	58
Tableau 5 - Description des données expérimentales	59
Tableau 6 - Résumé de l'utilisation de l'eau souterraine (Larocque et al., 2015a, p.189)	61
Tableau 7 - La liste des entités.....	63
Tableau 8 - Sommaire des dépassements de normes de potabilité – Éléments inorganiques	65
Tableau 9 - Sommaire des dépassements de normes de potabilité dans l'aquifère granulaire - Détection de nitrates.....	67
Tableau 10 - Sommaire des dépassements de normes de potabilité dans l'aquifère au roc - Détection de nitrates	68
Tableau 11 - Sommaire des dépassements de normes de potabilité dans l'aquifère granulaire - Bactériologie	69
Tableau 12 - Sommaire des dépassements de normes de potabilité dans l'aquifère au roc - Bactériologie.....	70
Tableau 13 - Sommaire des dépassements esthétiques.....	71
Tableau 14 - Détection d'au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2013.....	76
Tableau 15 - Détection d'au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2014.....	77

Glossaire et acronymes

AGTCQ :	Agence de Géomatique du Centre-du-Québec
COPERNIC :	Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet
COGESAF :	Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François
GML :	Geography Markup Language
HTML :	Hyper Text Markup Language
J2EE :	The Java 2 Enterprise Edition
MDDELCC :	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MRC :	Municipalité régionale de comté
OGC :	Open Geospatial Consortium
PACES :	Le projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines
PACES-NSF :	Le projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François, Centre-du-Québec
PPSP :	Pesticides et produits pharmaceutiques et de soins personnels
SCDM :	Système de cartographie dynamique multiéchelle
SGBDR :	Système de gestion de la base de données relationnelle
SE :	Symbology Encoding
SLD :	Styled Layer Descriptor
SQL :	Structured Query Language
SIG :	Système d'information géographique
XML :	Extensible Markup Language
WMS :	Web Map Service
WFS :	Web Feature Service

Remerciements

Tout d'abord, j'exprime toute ma gratitude au Professeur Goze Bertin Bénéié, mon directeur de recherche, pour son soutien, ses conseils, ses encouragements tout au long de mes études.

Je voudrais remercier la Professeure Marie Larocque, ma codirectrice de recherche, pour sa révision, ses corrections de mon mémoire, et ses connaissances relatives aux eaux souterraines. Je remercie également l'équipe de réalisation du projet PACES-NSF de l'Université de Québec à Montréal et les partenaires de ce projet.

J'adresse mes remerciements au professeur Pham Van Cu de l'Université des sciences de Hanoi de l'Université nationale du Vietnam à Hanoi qui m'a conseillé sur cette excellente opportunité d'aller étudier au Canada. Je ne vais jamais l'oublier.

De plus, j'aimerais souligner ici les collègues à Géoimage Solution Inc., où j'ai fait mon stage d'entreprise :

- Dr Yves Voirin : un grand merci pour ses conseils techniques,
- Dre Claire Müller-Poitevien et M. Michel Yergeau pour leurs encouragements et leurs corrections au niveau linguistique,
- M. Ahmad Hassoun, M. Alexandre Delahaye, M. Alassane Tigana, M. Lucien Bénéié : pour leurs connaissances et leurs expériences en programmation.

Un gros merci à ma famille, à mes amis au Vietnam et au Canada pour leurs encouragements à poursuivre mes études et à améliorer mes connaissances.

Enfin, je voudrais remercier le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques pour m'avoir offert une bourse d'études afin de réaliser ce projet de maîtrise.

1. Introduction

1.1. Contexte du projet de recherche

Au Québec, l'eau souterraine permet l'approvisionnement en eau d'environ 20 % de la population totale et de plus de 80 % de la population en zone rurale (MDDELCC, 2013). En 2008, le gouvernement a décidé d'améliorer les connaissances sur cette ressource en créant le Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec (PACES). L'objectif principal de ce programme est de dresser un portrait réaliste et concret de la ressource en eau souterraine des territoires municipalisés du Québec. Le projet a été réalisé en trois phases :

Phase 1 (entre 2009 et 2013) : incluant des projets dans la région du sud-ouest de la Mauricie (Leblanc *et al.*, 2013), dans la région de Bécancour (Larocque *et al.*, 2013), dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean (CERM-PACES, 2013), dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 1) (Cloutier *et al.*, 2013), et dans la région de la Montérégie Est (Carrier *et al.*, 2013).

Phase 2 (entre 2010 et 2013) : incluant des projets sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (Talbot Poulin *et al.*, 2013), et dans la région de l'Outaouais (Comeau *et al.*, 2013).

Phase 3 (entre 2012 et 2015) : incluant des projets dans les bassins versants du nord-est du Bas-Saint-Laurent, dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 2) (Cloutier *et al.*, 2015), dans la région de Chaudière-Appalaches (Lefebvre *et al.*, 2015), dans les bassins versants de la rivière Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François (Larocque *et al.*, 2015a), dans la région de Vaudreuil-Soulanges (Larocque *et al.*, 2015b), de même que dans la région de Charlevoix/Haute-Côte-Nord (CERM-PACES, 2015).

La zone de gestion intégrée de l'eau de la rivière Nicolet et la partie basse de la zone intégrée de l'eau de la rivière Saint-François dans le Centre-du-Québec se trouvent dans un secteur où les eaux souterraines ont fait récemment l'objet d'un projet de recherche

réalisé par une équipe du département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM dans le cadre de la phase 3 du PACES (Larocque *et al.*, 2015a). Dans cette région, 46 % de la population s'alimente en eau potable à partir de l'aquifère (MAMROT, 2013; MDDELCC, 2013). Le projet a été réalisé par l'Université du Québec à Montréal (UQAM), en collaboration avec l'Université de Sherbrooke, les organismes de bassin versant COPERNIC et COGESAF, Agence de Géomatique du Centre-du-Québec (AGTCQ), les Conférences régionales des élus et un ensemble de partenaires municipaux. Ce projet de maîtrise fait partie du projet PACES-NSF pour concevoir et développer un système de gestion des eaux souterraines. L'approche utilisée permet de synthétiser les connaissances acquises dans le projet pour les rendre accessibles aux gestionnaires du territoire et aux utilisateurs de la ressource. Ce mémoire se divise en six chapitres suivants :

- (1) **Introduction** : ce chapitre présente l'introduction du sujet de recherche incluant la problématique, l'objectif principal, les objectifs spécifiques, et les hypothèses du projet de recherche.
- (2) **Revue bibliographique** : ce chapitre présente une revue de littérature sur les applications des systèmes d'information géographique (SIG) à la gestion des eaux souterraines, les atlas de l'eau, la cartographie dynamique ainsi que les outils libres et ouverts.
- (3) **Méthodologie** : ce chapitre présente le territoire concerné par cette étude, le schéma méthodologique et toutes les étapes méthodologiques permettant de répondre aux objectifs du projet tels que l'acquisition des données, l'analyse des besoins, la modélisation spatiale du système, et le choix de la méthode du développement.
- (4) **Résultats** : ce chapitre fournit tous les résultats obtenus du projet de recherche incluant la base de données à référence spatiale, et l'interface de diffusion cartographique.
- (5) **Analyse et discussion des résultats** : les résultats finaux sont discutés et analysés.

(6) **Conclusion et recommandations** : la conclusion est associée à quelques recommandations pour les futures recherches dans ce domaine.

1.2. Problématique

La diffusion des résultats des projets PACES présente des défis très particuliers auxquels le PACES-Nicolet Saint-François ne fait pas exception. Il est nécessaire de synthétiser un grand nombre de données de manière efficace : modèle hydrostratigraphique, topographie, hydrographie, hydrologie, données géologiques sur les unités rocheuses et quaternaires, description des forages, propriétés hydrauliques des matériaux, contexte hydrogéologique, cartes isopaques, utilisation de l'eau souterraine, qualité de l'eau, activités humaines ayant un impact sur la qualité de l'eau (Larocque *et al.*, 2015a). Les livrables de ce projet sont présentés en annexe 1.

Selon Abdalla (2012), la télédétection et le SIG offrent un large potentiel pour un gestionnaire des eaux souterraines. Pour d'autres auteurs, le SIG est un outil puissant pour la gestion des données spatiales, la prise de décision et l'évaluation des vulnérabilités des ressources en eau souterraine (Abdalla, 2012; Jha et Pfeiffer, 2006). Ce travail de recherche traite de la question de recherche suivante : « Comment synthétiser et visualiser clairement les connaissances et les caractéristiques des eaux souterraines en matière de géomatique ? »

Un besoin important de la diffusion des connaissances acquises dans les projets PACES consiste à synthétiser et à visualiser des cartes pour les rendre plus intuitives et accessibles à un grand nombre de personnes. Cependant, des cartes sous format papier ou numérique présentent des limites de diffusion vers de nombreux utilisateurs. Les logiciels commerciaux sont toujours limités par des droits d'auteurs et des coûts d'entretien ou de mise à jour. Avec les logiciels libres, les utilisateurs ont la liberté d'exécuter, de copier, de distribuer, de modifier et d'améliorer le logiciel. Ceci est particulièrement important puisqu'en ce moment, la communauté *Opensource* en géomatique se développe partout dans le monde (Steiniger et Hunter, 2013). Ce mouvement crée une immense bibliothèque avec plusieurs fonctions utiles pour les développeurs. Selon Iosifescu-

Enescu *et al.*, (2010), une cartographie sur le Web avec des standards ouverts est une solution aux défis cartographiques de gestion de l'environnement. Les systèmes de cartographie sur le Web peuvent en effet prendre en charge un nombre illimité d'utilisateurs, être accessibles depuis n'importe quel endroit et à tout moment à l'aide d'internet (Rautenbach, 2012; Mathiyalagan *et al.*, 2004). Plus particulièrement, avec un système de cartographie dynamique multiéchelle, les non-experts en géomatique ayant peu de connaissances en géographie peuvent interagir facilement avec des données spatiales (Peterson, 2008; Chang et Park, 2004). En ce qui concerne la diffusion des données portant sur les eaux souterraines, les avantages viennent du fait qu'un système de cartographie dynamique Web distribue effectivement les caractéristiques liées aux eaux souterraines et peut résoudre les problèmes de partage massif de données avec des utilisateurs de l'eau et des gestionnaires du territoire à travers internet.

1.3. Objectifs

Ce travail est une composante du projet PACES-Nicolet Saint-François (PACES-NSF) qui vise à faire la caractérisation des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Nicolet et de la partie basse du bassin versant de la rivière Saint-François. Ce projet de maîtrise a pour objectif général de faciliter la diffusion des connaissances sur les eaux souterraines dans cette région.

Les objectifs spécifiques de ce projet de recherche sont de :

- stocker les données relatives aux eaux souterraines sur la zone d'étude du PACES dans une base de données à référence spatiale;
- concevoir et de développer un système de cartographie dynamique multiéchelle en ligne sur la caractérisation des eaux souterraines.

1.4. Hypothèses

L'hypothèse générale est qu'un système de cartographie dynamique multiéchelle (SCDM) peut permettre aux acteurs de l'eau et aux gestionnaires du territoire d'avoir une vision régionale des connaissances et des caractéristiques des eaux souterraines.

Hypothèses spécifiques :

- Diverses données thématiques concernant les caractéristiques des eaux souterraines peuvent être organisées par secteur dans la base de données relationnelle à référence spatiale du SCDM.
- L'approche multiéchelle et la présentation de cartes par un simple clic peuvent constituer la fondation d'un atlas numérique de caractérisation de l'eau souterraine pour des usagers non-géomaticiens.

2. Revue bibliographique

Cette revue de littérature vise à trouver une méthode efficace en lien avec la problématique de ce projet de recherche. Les recherches bibliographiques effectuées se sont concentrées sur les applications des SIG dans les études portant sur la caractérisation des eaux souterraines. En particulier, les recherches sont liées à des atlas de l'eau, à la cartographie dynamique, et aux logiciels libres et ouverts.

2.1. Application SIG sur la gestion des eaux souterraines

« Un SIG est un système d'information spatiale pour lequel la terre est l'objet de référence fondamental. Il traite d'un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir prendre des synthèses utiles à la décision. » (Bénié, 2002). Selon Rhin (1989), un SIG est un système de matériels, logiciels et procédures visant à soutenir la saisie, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage des données à référence spatiale pour résoudre des problèmes complexes de la planification et de la gestion. Grâce au développement des ordinateurs puissants et aux progrès de la technologie de l'espace, le SIG est efficacement appliqué dans de nombreux domaines différents : la gestion urbaine, la gestion du territoire, la gestion forestière, etc. Le SIG joue également un rôle important dans la gestion des eaux souterraines (Abdalla, 2012; Jha *et al.*, 2007).

Selon Jha *et al.* (2007), les applications du SIG aux eaux souterraines peuvent être classées en six grands groupes :

- (1) l'exploration et l'évaluation des ressources en eau souterraine,
- (2) la sélection des sites de recharge artificielle,
- (3) la modélisation de l'écoulement de sous-surface et de la pollution basée sur le SIG,
- (4) l'évaluation des risques de la pollution des eaux souterraines et la planification de protection,
- (5) l'estimation de la distribution de la recharge naturelle,
- (6) l'analyse des données hydrogéologiques et la surveillance des processus.

Dans tous les projets de caractérisation des eaux souterraines du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), le SIG est efficacement utilisé pour la mise en forme cartographique des données selon l'une ou plusieurs des tendances ci-dessus. Les données acquises, les cartes produites et les analyses qui en découlent seront directement utiles pour la gestion de la ressource en eau à l'échelle du bassin versant (Carrier *et al.*, 2013; CERM-PACES, 2013; Cloutier *et al.*, 2013; Comeau *et al.*, 2013; Larocque *et al.*, 2013; Leblanc *et al.*, 2013; Talbot Poulin *et al.*, 2013; CERM-PACES, 2015; Cloutier *et al.*, 2015; Larocque *et al.*, 2015a; Larocque *et al.*, 2015b; Lefebvre *et al.*, 2015).

2.2. Atlas de l'eau

Les précédentes recherches portant sur les eaux souterraines ont mentionné que l'atlas propose une excellente synthèse sur la question de l'eau, des pistes de réflexion et des solutions sur les ressources, leur utilisation, leur gestion et les défis à venir (Blanchon, 2013).

Lemoalle et De Condappa (2009, p.26-30) ont proposé qu'un atlas donne un état des lieux à un moment donné. Leur projet « *Basin Focal Project Volta* » du Challenge Programme Eau et Alimentation a permis la collecte et la production de données à l'échelle du bassin de la Volta en Afrique de l'Ouest. Les résultats du projet sont résumés sous la forme d'un atlas accessible à un grand nombre d'utilisateurs. Les auteurs ont cartographié le potentiel utilisable des eaux souterraines en termes d'accessibilité, d'exploitabilité et de régularité de l'approvisionnement. L'atlas de l'eau a permis de mettre en évidence que les eaux souterraines se retrouvent principalement le long de la bordure sud-ouest du bassin. En conséquence, cette région est idéale pour exploiter les eaux souterraines. Dans les régions où le potentiel de développement de la ressource est faible, d'autres stratégies sont requises pour l'alimentation en eau.

Barker *et al.* (2011) ont souligné que l'atlas de l'eau souterraine aidera les albertains à mieux comprendre les ressources en eaux souterraines de la province en décrivant la mise

à disposition des données de ces ressources. Ils ont présenté des cartes de la description de la zone d'étude, de la géologie, des propriétés physiques et chimiques des eaux souterraines. Cet atlas permet aux albertains d'avoir accès à la connaissance nécessaire pour atteindre de l'eau potable, des écosystèmes aquatiques sains, et de l'approvisionnement en eau de qualité. Par conséquent, ils peuvent savoir comment leurs comportements influent sur la qualité et la quantité de l'eau, et la santé des écosystèmes. En plus, des gestionnaires du territoire et d'autres parties prenantes peuvent comprendre les risques qui pèsent sur les eaux souterraines puis prendre de bonnes décisions pour protéger ces ressources.

La recherche de Larocque *et al.* (2015a) concerne la caractérisation des eaux souterraines dans la zone de gestion intégrée de l'eau Nicolet et sur la partie basse de la zone de gestion intégrée de l'eau de la rivière Saint-François dans la région Centre-du-Québec. Les résultats du projet ont été présentés sous forme cartographique comme un atlas de l'eau. Ce travail permet de dresser un portrait de la ressource en eau souterraine dans la zone d'étude et de favoriser une saine gestion de la ressource en développant des partenariats entre les acteurs de l'eau et les gestionnaires du territoire dans l'acquisition des connaissances sur cette ressource (Larocque *et al.*, 2015a, p.1).

2.3. Cartographie dynamique

Selon Pornon *et al.* (2008), «un *webmapping* est un ensemble d'applications cartographiques dynamiques et interactives disponibles sur le Web permettant principalement à un utilisateur de visualiser des cartes contenant plus ou moins d'informations géographiques. Le terme « dynamique » signifie que des fonctions comme le zoom, le choix de l'affichage des couches ou encore des gadgets comme les infobulles sont disponibles. ».

Panagos *et al.* (2008) ont développé un SIG qui permet aux utilisateurs d'échanger et d'analyser des données sur les sols. De plus, les utilisateurs peuvent avoir accès à la base de données locale via Internet pour l'affichage, la recherche et l'analyse de divers indicateurs environnementaux comme les carbones organiques du sol. Ce portail

contribue à une infrastructure de données spatiales thématique caractérisant les sols en Europe.

Chang et Park (2004) ont réalisé une application SIG sur Internet pour la gestion efficace des données de forage et de géologie. Les auteurs ont collecté des données de plus de 10 000 forages et d'autres données géologiques dans une zone urbaine de Séoul en Corée du Sud. Ces données ont été archivées et organisées dans une base de données spatiale. Pour exploiter ces données, un SIG a été développé pour différentes fonctionnalités comme : (1) la recherche d'information géologique (2) la visualisation des cartes géologiques (3) les relevés statistiques liés aux forages et (4) les fonctions administratives. Les auteurs ont présenté les avantages de leur système :

- (1) Des données géologiques peuvent être fournies à beaucoup d'utilisateurs en même temps, et de plus, ils peuvent facilement partager leurs données à travers ce système sur Internet.
- (2) Les ingénieurs peuvent instantanément entrer et mettre à jour les données géologiques sur le site. Cette gestion de données en temps réel peut réduire le temps et les coûts pour les travaux de construction.
- (3) Les entreprises peuvent accéder aux données géologiques utiles sur Internet et faire un plan préliminaire avant le début de leurs travaux de construction, par exemple, la sélection de sites nécessitant des enquêtes détaillées.
- (4) Ce système peut devenir un fournisseur de données géologiques utiles pour d'autres applications connexes telles que les projets environnementaux, les projets d'aménagement urbain et de conception de réseaux de transport.

Mathiyalagan *et al.* (2005) ont également développé un outil interactif basé sur Internet pour intégrer et visualiser des données géospatiales et des informations des zones humides en Floride. Ils ont ensuite fourni des cartes et des services de données aux utilisateurs finaux. Les auteurs ont normalisé et intégré près de 2130 observations ponctuelles géoréférencées de 78 différents types de données physiques, chimiques et biologiques, organiques dans le sol qui ont été recueillies dans les zones humides de la

Floride à partir de 1987 à 2005. Les utilisateurs peuvent exécuter des requêtes SQL (*Structured Query Language*) et filtrer des données spécifiques en utilisant une ou plusieurs contraintes telles que :

- (1) l'emplacement géographique,
- (2) la projection cartographique,
- (3) la date où la donnée a été acquise,
- (4) la profondeur de l'échantillon,
- (5) le type de végétation,
- (6) la propriété du sol.

Les deux systèmes mentionnés ci-dessus ont été développés en se basant sur la même architecture logicielle pour l'application SIG qui se compose de trois éléments : *ESRI ArcIMS package*, le logiciel de Serveur Web et le système de gestion de base de données relationnelle (Mathiyalagan *et al.*, 2004; Chang et Park, 2004). La technologie utilisée est robuste et efficace, mais le coût des logiciels commerciaux est toujours une problématique pour des projets de recherche.

D'après Ionut *et al.* (2010), la cartographie en ligne ou « *Web mapping* » avec des standards ouverts est une solution aux défis cartographiques de la gestion environnementale. Les problèmes de gestion environnementale et de gestion de risques liés aux tremblements de terre et aux inondations ont la particularité d'être urgents et complexes, et requièrent des décisions rapides. En cas d'une catastrophe quand la vie et les biens sont en danger, la visualisation cartographique doit être effectuée automatiquement en fonction des règles prédéfinies. Cependant, la complexité des sources de données dynamiques est un grand défi pour la cartographie. Ionut *et al.* (2010) ont mentionné une combinaison entre trois standards d'*Open Geospatial Consortium* (OGC) tels que : *Web Map Service* (WMS), *Styled Layer Descriptor* (SLD) et *Symbology Encoding* (SE). Le WMS a été utilisé pour présenter des cartes topographiques. Le SLD et le SE permettent de symboliser des points, des lignes, des polygones, et des textes. En plus, les extensions de cartographie du SE permettent d'exprimer des règles

cartographiques avec des opérateurs de la relation spatiale et des fonctions avancées pour filtrer des objets.

Han *et al.* (2012) ont développé une application nommée « CropScape ». Cette application offre les fonctionnalités de la carte interactive en ligne, la personnalisation et le téléchargement des données, les statistiques de la superficie des cultures et l'analyse des changements temporels (figure 1). En plus, le CropScape fournit des services de géotraitement tels que la livraison automatique des données et la demande des statistiques de récolte pour les utilisations dans d'autres applications. Ils ont utilisé la technologie libre et ouverte avec les standards d'*Open Geospatial Consortium* (OGC). Le développement est basé sur l'architecture 3-tiers. Les bibliothèques de développement sont ExtJS et OpenLayers.

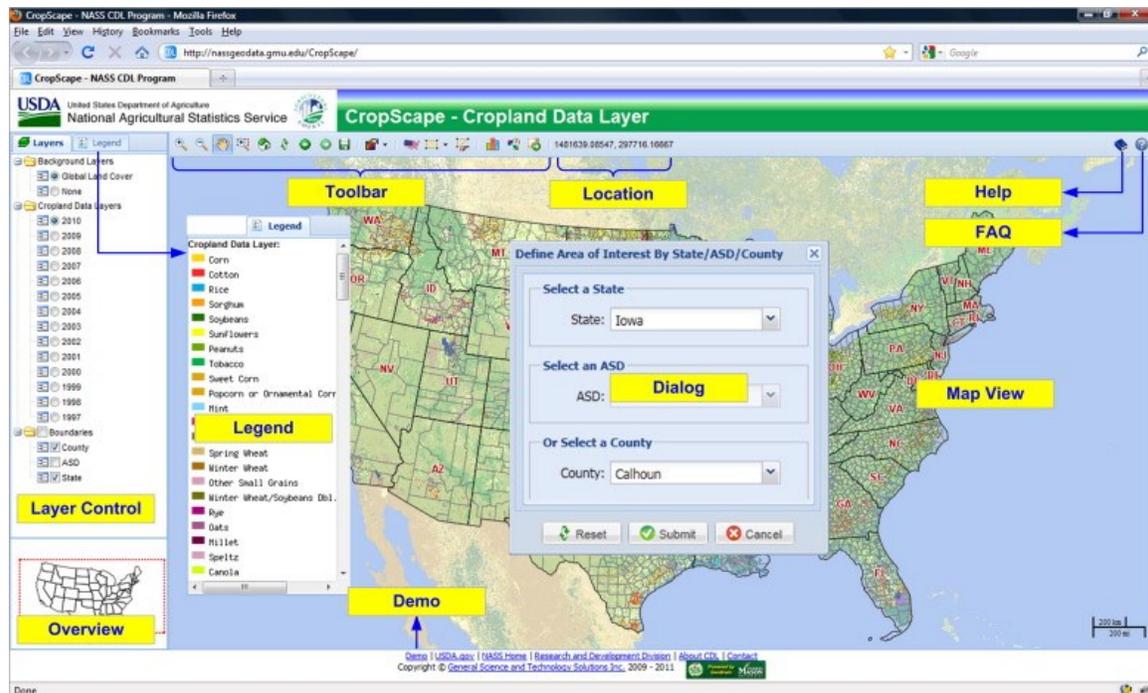


Figure 1 - L'interface utilisateur de CropScape (Han *et al.*, 2012)

Au Québec, la Communauté métropolitaine de Québec a également développé une plateforme de mise en ligne d'outils géomatiques aux fins de visualisation et d'analyses des données hydrogéologiques (Talbot Poulin *et al.*, 2013). Cette plateforme permet l'intégration des données hydrogéologiques pour la prise de décision en aménagement à

l'aide de fonctionnalités de la carte interactive en ligne. Une technologie commerciale a été choisie pour développer cette application.

2.4. Les outils libres et ouverts mettant en œuvre la cartographie dynamique

2.4.1. Les normes internationales

En ce qui concerne la diffusion des données géospatiales sur Internet, il est nécessaire d'avoir des normes internationales pour l'interopérabilité des systèmes et des applications. L'*Open Geospatial Consortium* (OGC) est un organisme international qui gère les normes internationales dans le domaine de géomatique sur Internet (OGC, 2015). Les normes populaires de l'OGC sont *Web Map Service* (WMS), *Web Feature Service* (WFS), *Styled Layer Descriptor* (SLD), *Geography Markup Language* (GML).

Le service WMS est une norme OGC permettant de représenter une abstraction de la donnée réelle à une échelle particulière sous la forme d'une image. Pour obtenir des cartes géoréférencées, il faut envoyer une requête http (Hypertext Transfer Protocol) aux serveurs cartographiques (OGC, 2015). Plusieurs pays gèrent des serveurs WMS pour la gestion des données géospatiales tels que le Canada, la France (NRCan, 2015; SIGEA, 2015).

Le service WFS est également une norme OGC qui permet de définir des interfaces pour décrire les opérations visant la manipulation d'entités géographiques (OGC, 2015). Le WFS retourne les informations géospatiales sous la forme d'une description GML avec la liste des attributs et l'intégrité géométrique. Cette norme est idéale pour l'interrogation des données et l'utilisation de fonctions spatiales telles que le tampon et l'intersection.

Le style d'affichage des objets géographiques est un paramètre important. Le fichier SLD est un document *Extensible Markup Language* (XML) qui étend la norme WMS pour permettre de définir la symbolisation et la coloration des objets géographiques par l'utilisateur (OGC, 2015). Il est possible que les utilisateurs puissent définir des règles de style telles que la taille par échelle et la couleur par attribut.

Le langage GML est un langage en format XML qui définit un format ouvert pour décrire des objets géographiques avec les informations tels que les systèmes de projection, la géométrie, la topologie, le temps, les unités de mesure et les attributs des objets géographiques (OGC, 2015). Le langage GML est une spécification pour les transactions géographiques sur Internet.

2.4.2. Les systèmes de gestion de base de données spatiale

Un système de gestion de base de données spatiale (SGBDS) offre une alternative au stockage des données géographiques dans les fichiers. Un SGBDS est utilisé si (i) les grands ensembles de données géographiques doivent être stockés, interrogés, analysés et mis à jour, et (ii) les opérations doivent être effectuées dans un délai aussi court que possible (Steiniger et Hunter, 2012). Dans le cadre de cette revue de littérature, nous avons travaillé sur deux systèmes de gestion de base de données spatiale libres et ouverts les plus populaires tels que MySQL et PostgreSQL.

En termes de gestion de données (à l'exception des données spatiales), MySQL est un système de gestion de données libre et ouvert très populaire. Beaucoup d'organisations les plus dynamiques dans le monde, comme Facebook, Google et Adobe, utilisent MySQL pour économiser le temps et l'argent (Oracle Corporation, 2015). Pour la gestion des données spatiales, MySQL a l'extension *Spatial Extensions*.

PostgreSQL, initialement appelé Postgres, a été créé à *University of California* à Berkeley par un professeur de science informatique nommé Michael Stonebraker (*PostgreSQL Global Development Group*, 2015) en 1986. Depuis 1996, PostgreSQL est devenu un logiciel libre et ouvert et il est développé par la communauté de développeurs du monde entier. PostgreSQL a l'extension PostGIS qui ajoute le support d'objets géographiques. Dans les applications liées aux données spatiales, PostgreSQL est utilisé plus souvent que MySQL grâce aux diverses spécificités et fonctionnalités de PostGIS (Steiniger et Hunter, 2012).

2.4.3. Les serveurs cartographiques

Un serveur cartographique offre essentiellement des services cartographiques qui permettent de fournir un accès aux données spatiales et de les transmettre à un réseau de communication (Steiniger et Hunter, 2012). Les deux serveurs les plus populaires dans l'environnement de développement libre sont MapServer et GeoServer. Ils sont utilisés pour le développement des applications sur Internet en supportant la gestion des données géospatiales.

MapServer a été initialement développé à l'Université du Minnesota dans la mi-1990. De nos jours, MapServer est soutenu et maintenu par les compagnies privées telles que DmSolutions Group, Autodesk, TMC Technologies, etc. Il est également maintenu, amélioré, et soutenu par des développeurs et des utilisateurs du monde entier. MapServer est mis à jour régulièrement en suivant les nouvelles spécifications de l'OGC (MapServer PSC, 2015).

GeoServer a été complètement développé en Java dans le projet « The Open Planning Project (TOPP) » à New York en 2001 par une entreprise à but non lucratif pour faire la promotion des logiciels libres et ouverts. GeoServer est conçu pour l'interopérabilité avec des données de toute source de données spatiales majeure en utilisant des normes ouvertes (Free Software Foundation, 2015).

Ces deux serveurs cartographiques libres et ouverts offrent des solutions similaires aux serveurs cartographiques commerciaux concernant la fonctionnalité et la capacité de mise en cache des tuiles (Steiniger et Hunter, 2012). Steiniger et Hunter ont mentionné que MapServer est préférable en termes de performance, d'évolutivité et de la stabilité, tandis GeoServer est plus facile à étendre et il suit les différentes normes de cartographie.

2.4.4. Les interfaces cartographiques

De nos jours, grâce aux technologies avancées, les applications cartographiques sur Internet peuvent offrir de plus en plus les mêmes fonctionnalités que les logiciels de bureau (Steiniger et Hunter, 2012). JavaScript est un langage de programmation pour les

systèmes axés sur le Web. OpenLayers et Leaflet sont les deux bibliothèques Javascript libres et ouvertes très connues pour le développement d'applications cartographiques sur le Web.

OpenLayers est une bibliothèque Javascript pour afficher des données géographiques dans la plupart des navigateurs Web, sans dépendre de côté serveur (2-clause BSD License, 2015). OpenLayers offre des outils spatiaux de visualisation et de manipulation pour simplifier le développement d'application géographique sur Internet. Leaflet est également une bibliothèque Javascript libre pour faire des cartes dynamiques sur Internet. Leaflet est conçu de façon simple, performante et conviviale (Vladimir, 2015).

La revue de littérature, a permis de développer un système de cartographie dynamique pour la caractérisation des eaux souterraines avec une technologie libre et ouverte. Le chapitre suivant précisera la méthodologie appliquée pour réaliser ce projet de recherche.

3. Méthodologie

3.1. Site d'étude

Le territoire visé couvre une superficie de 4 585 km² située au sud du fleuve Saint-Laurent, comprenant principalement la région du Centre-du-Québec (figure 2). La zone d'étude couvre tout le bassin versant de la rivière Nicolet sur une superficie de 3 408 km² et aussi la partie basse de la rivière Saint-François sur une superficie 906 km². Cette zone d'étude touche principalement les territoires des Municipalités régionales de comté (MRC) d'Arthabaska, de Nicolet-Yamaska, de Drummond et des Sources (tableau 1). La population du secteur d'étude est estimée à 192 087 habitants (Larocque *et al.*, 2013).

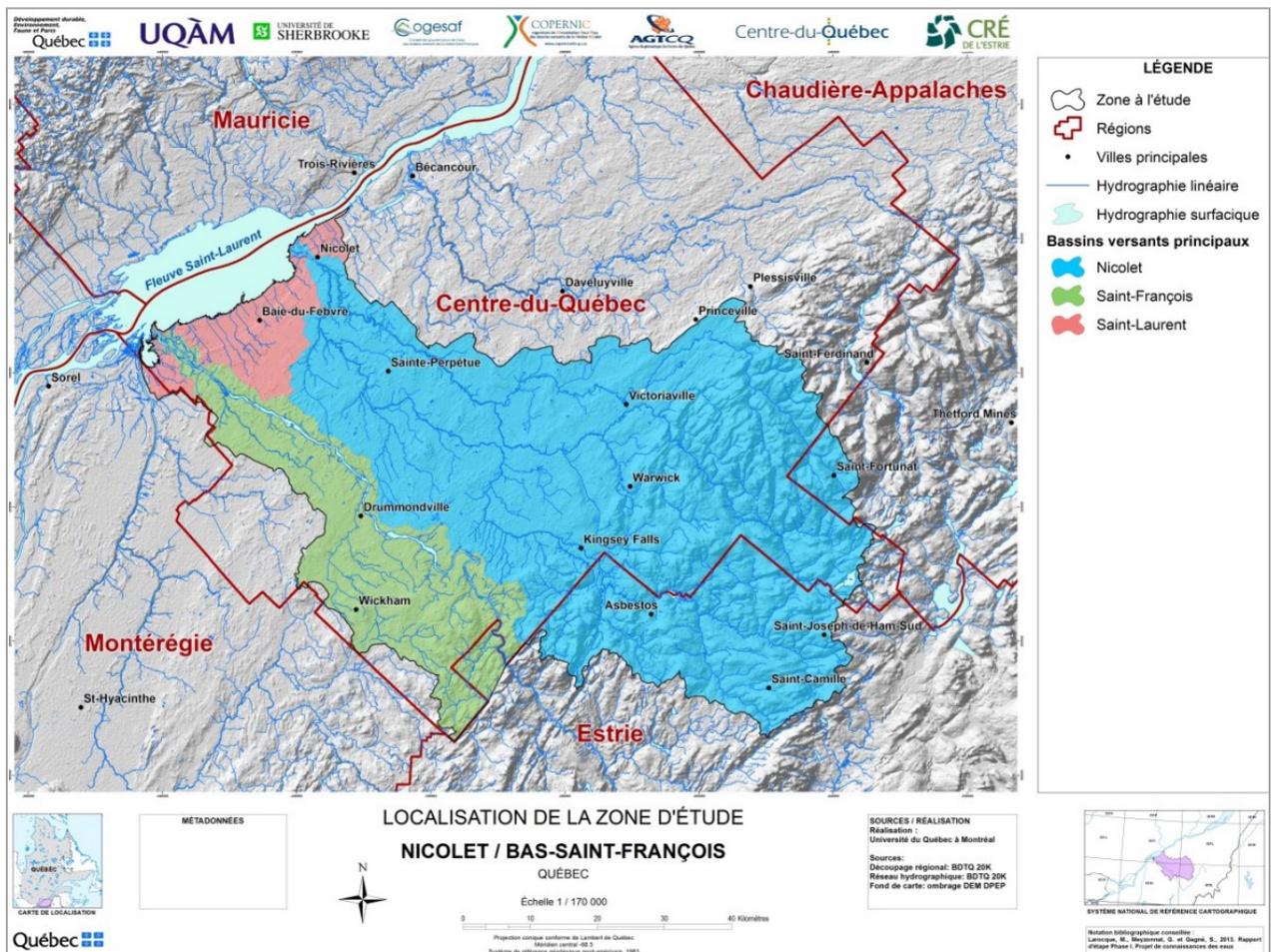


Figure 2 - Zone couverte par le projet de connaissances des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François (Larocque *et al.*, 2013)

Tableau 1 - MRC, superficie et population du territoire étudié (Larocque *et al.*, 2013)

MRC	Superficie totale de la MRC (km²)	Superficie dans territoire visé (km²)	Population dans territoire visé (habitants)
Arthabaska	1 904	1 557	64 359
Drummond	1600	1248	92 043
Nicolet-Yamaska	1 003	757	18 434
Les Sources	777	666	14 194
L'Érable	1 281	142	1 500
Val-Saint-François	1 380	90	777
Les Appalaches	1 906	80	250
Haut-Saint-François	2 277	27	175
Pierre-de-Sorel	594	12	55
Bécancour	1 133	5	300
Acton	574	1	0
Total		4 585	192 087

3.2. Schéma méthodologique

Les principales techniques, les méthodes de collecte et d'analyse des données utilisées au cours de la recherche sont présentées à la figure 3. La méthodologie est réalisée en cinq étapes principales :

- (1) l'acquisition des données,
- (2) l'analyse des besoins et la modélisation spatiale du système,
- (3) l'organisation d'une base de données,
- (4) le développement de modules d'application,
- (5) la mise en opération du système et l'analyse des résultats.

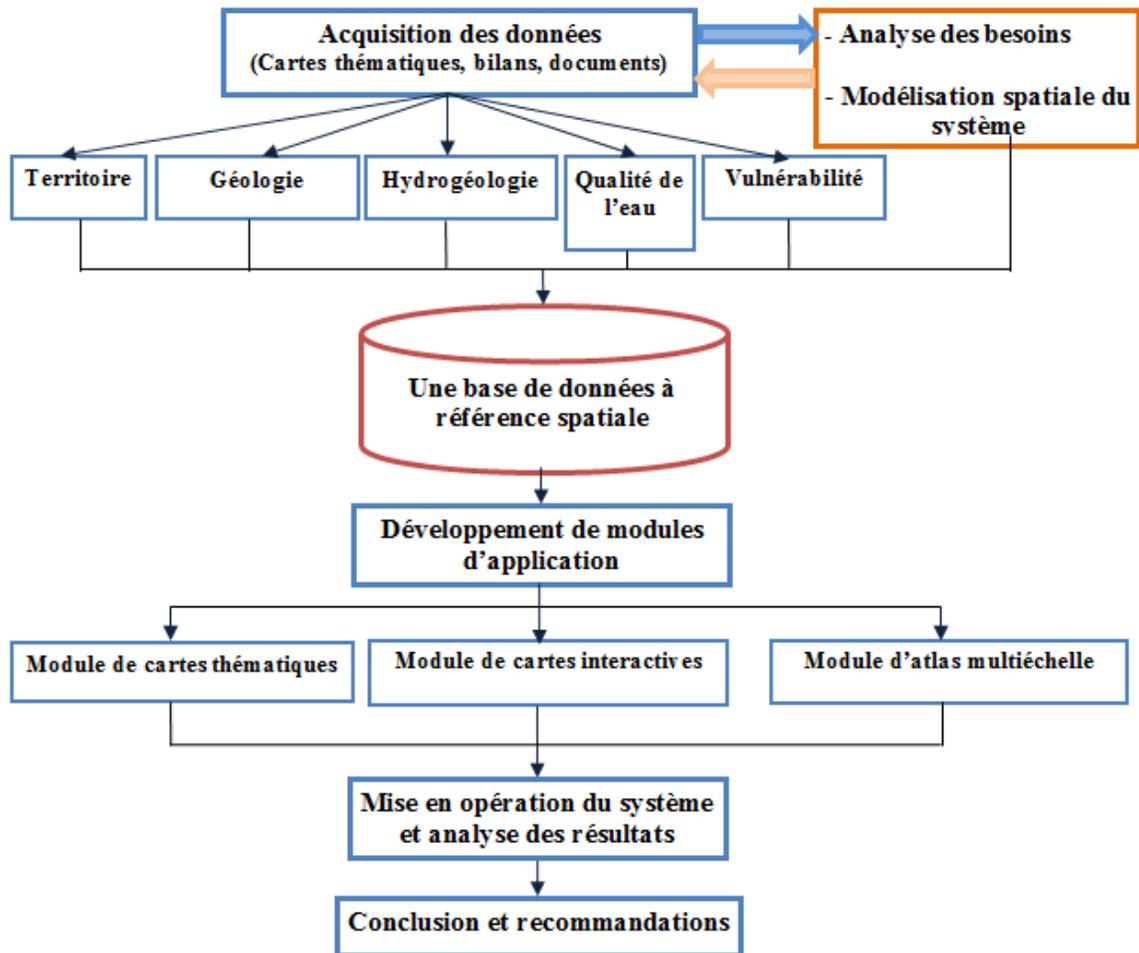


Figure 3 - Schéma méthodologique de la recherche

3.3. Acquisition des données

Les données utilisées sont issues des résultats du projet PACES-NSF et sont détaillées dans l'annexe 2. Toutes les cartes produites dans ce projet sont présentées à l'échelle 1/100 000 en fonction des données disponibles (Larocque *et al.*, 2015a). Ces données ont été collectées à partir de plusieurs sources présentées ci-dessous :

- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)
- Canards illimités Canada (CIC)
- Base de données des cultures généralisées (BDCG)
- Base de données topographiques du Québec (BDTQ)
- Direction du patrimoine écologique et des parcs (DPEP)
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

- Ministère des Affaires municipales, Régions Occupation du territoire (MAMROT)
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC)
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN)
- Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG)
- Ministère des Transports du Québec (MTQ)
- Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA)
- Système d'information géo-minier (SIGEOM)
- Système d'information écoforestière (SIEF)
- Système d'information hydrogéologique (SIH)

La projection conique conforme de Lambert de Québec et le système de référence géodésique nord-américain (1983) sont utilisés pour la production de toutes les cartes du projet.

3.4. Analyse des besoins

Avant de procéder aux opérations techniques liées aux SIG, il faut planifier et analyser les besoins du monde réel (Bénié, 2002). Cette planification passe d'abord par la définition des utilisateurs du système appelés à synthétiser, analyser et partager les connaissances sur les eaux souterraines. Ces utilisateurs seront principalement des gestionnaires du territoire et des utilisateurs de l'eau dans la zone d'étude, des chercheurs, des professeurs et des étudiants intervenant en sciences de l'eau. Par conséquent, le système devra être convivial et ne devra pas exiger de compétences particulières en matière d'informatique.

3.4.1. Identification des besoins

Des réunions et des conférences du projet PACES-NSF avec des gestionnaires du territoire et des utilisateurs de l'eau, nous ont permis d'identifier les deux principales raisons de développement d'un système de cartographie dynamique multiéchelle.

- Raison 1 (pour des utilisateurs de l'eau) : l'accès aux informations de la caractérisation des eaux souterraines dans leur région,
- Raison 2 (pour des gestionnaires du territoire) : une vision régionale de la ressource en eau souterraine.

3.4.1.1. Caractérisation des eaux souterraines

Les données sur les eaux souterraines ont été identifiées dans quatre principales catégories présentées dans cette section.

a) Présentation du territoire à l'étude

La présentation du territoire consiste à établir les conditions physiques générales existant dans la zone d'étude. Ceci inclut les informations concernant la topographie, le réseau routier, les limites municipales, l'hydrographie, les limites de bassins et de sous-bassins, la pente du sol, la couverture végétale, les milieux humides, la pédologie, l'occupation du sol ainsi que l'affectation du territoire.

b) Contextes hydrogéologiques régionaux

▪ Géologie du socle rocheux

D'après les travaux de Larocque *et al.* (2015a, p.64), la zone d'étude comprend 26 formations géologiques présente à l'affleurement et dans les premiers 100 m sous la surface. Une carte géologique du roc a été produite par l'équipe du projet PACES-NSF. Elle présente les limites surfaciques des formations rocheuses et la location des failles et des plis.

▪ Géologie du Quaternaire

Une carte géologique du Quaternaire (texture, structure, couleur, compacité, composition lithologique) a été produite pour illustrer la répartition spatiale des dépôts quaternaires sur la zone d'étude (Larocque *et al.*, 2015a, p.75-77). Une carte topographique du roc a été produite en soustrayant la couche d'épaisseur des dépôts

meubles au Modèle numérique altimétrique (MNA). Ces cartes géologiques permettent de mieux comprendre la nature des formations aquifères.

▪ **Conditions de confinement**

Les niveaux de confinement sont généralement liés à la géologie du Quaternaire. Une carte aux conditions de confinement de l'aquifère au roc est tracée à l'échelle de la zone d'étude (Larocque *et al.*, 2015a, p.100). Les conditions de confinement ont été définies selon les critères suivants :

- Nappe captive : plus de 3 m d'argile ou plus de 5 m de till compact
- Nappe semi-captive : de 1 à 3 m d'argile ou de 3 à 5 m de till compact
- Nappe libre : moins de 1 m d'argile et moins de 3 m de till compact

▪ **Contextes hydrogéologiques**

Plusieurs types de dépôts ont été identifiés tels que des dépôts de roc, de granulaire, de till, de till remanié, etc. Notre analyse est basée sur les travaux de séquence de dépôts meubles de Larocque *et al.* (2015a, p.101).

c) Conditions hydrogéologiques

▪ **Piézométrie et écoulement**

Une carte piézométrique, l'un des éléments les plus importants de la représentation de l'écoulement de l'eau souterraine, a été produite pour présenter les élévations par rapport au niveau moyen de la mer. Les niveaux piézométriques sur la zone d'étude varient de 0 m en zone aval à 670 m en zone amont. Cette carte piézométrique permet de connaître l'origine et les directions d'écoulement de l'eau souterraine (Larocque *et al.*, 2015a, p.118).

▪ **Recharge**

Un bilan hydrique de l'aquifère a été réalisé pour calculer la recharge potentielle à l'aquifère. À l'échelle de la zone d'étude, la distribution de la recharge varie d'un maximum de 518 mm/an à un minimum de 0 mm/an. Les zones de recharge de l'aquifère

fracturé dans la partie amont de la zone d'étude sont les plus importantes (Larocque *et al.*, 2015a, p.129-131).

- **Vulnérabilité des nappes**

La vulnérabilité de l'eau souterraine pour la zone d'étude a été estimée grâce à l'indice DRASTIC. L'indice de vulnérabilité de l'aquifère rocheux varie d'un maximum de 185 à un minimum de 24 sur la zone d'étude. La vulnérabilité est très faible (indice DRASTIC de 24 à 75) pour les secteurs où l'aquifère au roc est en conditions captives, soit pour tout le secteur couvrant l'aval de la zone d'étude, de l'axe entre Sainte-Perpétue et Saint-Bonaventure jusqu'au fleuve (Larocque *et al.*, 2015a, p.135-138).

- **Géochimie de l'eau souterraine**

Il est essentiel de connaître les informations géochimiques de l'eau souterraine. Dans la zone d'étude, les processus hydrogéochimiques sont contrôlés. Les types d'eau ont été définis en fonction des concentrations en ions majeurs (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻ et SO₄²⁻). Une carte a été produite pour classifier des échantillons d'eau par des types d'eau pour l'aquifère au roc. Selon Larocque *et al.* (2015a, p.141), le type Ca-HCO₃ est le plus répandu dans la zone d'étude (principalement dans les zones d'aquifère libre).

d) Activités anthropiques

- **Densité des activités anthropiques**

Afin de bien gérer la ressource en eau souterraine, les informations concernant les tendances régionales de la pression des activités anthropiques sur cette ressource sont importantes. Un indice a été défini pour estimer la densité des activités anthropiques sur la zone d'étude pour évaluer l'impact potentiel des activités selon le risque appréhendé sur la qualité de la ressource en eau souterraine. La densité des activités anthropiques varie d'un maximum de 93 à un minimum de 0 activités/km² sur la zone d'étude. D'après les travaux de Larocque *et al.*, (2015a, p.217), les villes de Drummondville, Victoriaville, Asbestos, Danville, Nicolet et Princeville possèdent l'indice de densité d'activités

anthropiques le plus élevé de la zone d'étude avec toutefois, des indices nuls en dehors des centres urbains ou industriels.

- **Densité des activités agricoles**

Un indice a été défini pour estimer la densité des sources de contamination potentielles diffuses, qui sont typiquement d'origine agricole et qui concernent l'utilisation de fertilisants et de pesticides. La densité des activités agricoles varie d'un maximum de 13 à un minimum de 0 fermes/km² sur la zone d'étude. Larocque *et al.* (2015a, p.187) notent que l'on retrouve la plus grande densité d'activités agricoles dans la portion aval de la zone d'étude, du fleuve Saint-Laurent jusqu'à l'axe formé par les villes de Drummondville et de Sainte-Perpétue.

3.4.1.2. Vision régionale de la ressource en eau souterraine

a) Usage de la ressource

Au total sur la zone d'étude, plus de 71 millions de m³ d'eau sont consommés chaque année, y compris 33 % provenant de l'eau souterraine (Larocque *et al.*, 2015a, p.189). L'annexe 3 représente la consommation d'eau sur la zone d'étude aux deux niveaux administratifs suivants : la MRC et la municipalité. Les MRC d'Arthabaska et de Drummond possèdent la consommation d'eau souterraine est la plus importante avec respectivement 11 608 823 m³/année et 5 965 958 m³/année. Les municipalités de Princeville et de Notre-Dame-du-Bon-Conseil consomment le plus d'eau souterraine dans la zone d'étude, avec respectivement 1 276 696 m³/année et 1 129 453 m³/année.

b) Qualité de la ressource

Pour assurer une eau souterraine de qualité, la gestion durable de cette ressource doit inclure le suivi d'indicateurs de qualité. Un suivi régulier du « Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec » permet d'identifier l'émergence des nouvelles problématiques liées à la qualité de l'eau dans les forages (Larocque *et al.*, 2015a, p.197). Dans le cadre du projet PACES-NSF, les données de qualité de l'eau ont été traitées en suivant le protocole de traitement et de représentation des données géochimiques (Larocque *et al.*, 2015a, 197). Les indicateurs de qualité tels que la norme de potabilité, les concentrations

en nitrates, en pesticides, et en produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP) ont été suivis dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

Les résultats du projet PACES-NSF fournissent des informations très utiles sur la consommation de l'eau souterraine et les indicateurs de la qualité de l'eau sur la zone d'étude. Cependant, ces résultats sont plus visuels s'ils sont présentés sous forme cartographique multiéchelle pour avoir une vision régionale de la ressource en eau souterraine.

3.4.2. Création des listes de questions

Pour faire la modélisation spatiale du système, les besoins ont été formulés en questions spécifiques (figure 4).

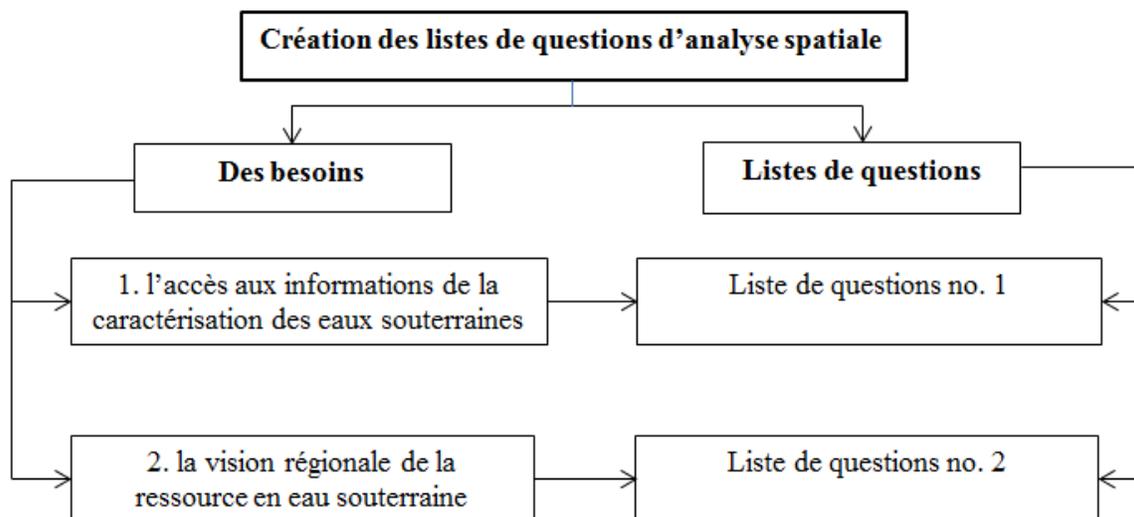


Figure 4 - Création des listes de questions d'analyse spatiale

3.4.2.1. Liste des questions no.1

a) Présentation du territoire à d'étude

- Q1 : Quelle est la topographie de la région Y ?
- Q2 : Quels sont les réseaux routiers, les MRC ou les municipalités dans la région Y ou dans la zone d'étude?
- Q3 : Quelle est l'altitude de l'endroit X ?
- Q4 : Quelle est la pente du sol de l'endroit X ou de la région Y ?
- Q5 : Où se situe la pente du sol la plus élevée ou la plus faible dans la zone d'étude ?

- Q6 : Quelles sont les rivières principales dans la zone d'étude ?
- Q7 : Quels sont les bassins et les sous-bassins dans la zone d'étude ?
- Q8 : Quel est le type de peuplement forestier de l'endroit X ou la région Y ?
- Q9 : Quel type de peuplement forestier est le plus/ moins répandu dans la zone d'étude ?
- Q10 : Où se situe le type de peuplement forestier le plus/ moins répandu dans la zone d'étude ?
- Q11 : Quel est le type de culture de l'endroit X ou de la région Y ?
- Q12 : Où se situe le type de culture le plus/ moins répandu dans la zone d'étude ?
- Q13 : Quel type de culture est le plus/ moins répandu dans la zone d'étude ?
- Q14 : Quels sont les types de milieu humide de la zone d'étude ?
- Q15 : Quel type de milieu humide est le plus/ moins répandu dans la zone d'étude ?
- Q16 : Où se situe le type de milieu humide du territoire le plus/ moins répandu dans la zone d'étude ?
- Q17 : Quel est le type de sol de l'endroit X ou de la région Y ?
- Q18 : Quel est le type d'occupation du sol de l'endroit X ou de la région Y ?
- Q19 : Quel type d'occupation du sol est le plus/ moins répandu dans la zone d'étude ?
- Q20 : Où se situe le type d'occupation du sol du territoire le plus/ moins répandu ?
- Q21 : Quel est le type d'affectation du territoire de l'endroit X ou la région Y ?
- Q22 : Quel type d'affectation du territoire est le plus/ moins répandu dans la zone d'étude ?
- Q23 : Où se situe le type d'affectation du territoire le plus/ moins répandu dans la zone d'étude ?

b) Contextes hydrogéologiques régionaux

- Q24 : Quelles sont les formations géologiques de l'endroit X ou de la région Y ?
- Q25 : Où se situent les formations géologiques les plus jeunes ou les plus anciennes dans la zone d'étude ?
- Q26 : Quel est l'unité stratigraphique quaternaire de l'endroit X ou de la région Y ?

- Q27 : Où se situe l'épaisseur des dépôts meubles la plus importante dans la zone d'étude ?
- Q28 : Quelle est l'élévation de la surface du roc de l'endroit X ?
- Q29 : Quel est le niveau de confinement de l'aquifère au roc de l'endroit X ou de la région Y ?
- Q30 : Où les zone de nappe libre / semi-captive / captive sont principalement localisées ?
- Q31 : Quel est le contexte hydrogéologique de l'endroit X ou de la région Y ?

c) Conditions hydrogéologiques

- Q32 : Quelle est le niveau piézométrique de l'endroit X ?
- Q33 : Où se situe l'intervalle de 50 m des courbes piézométriques ?
- Q34 : Où se situent les zones de résurgence de l'eau souterraine dans la région Y ?
- Q35 : Où se situent les zones de recharge préférentielles dans la région Y ?
- Q36 : Où se situent les zones de recharge de l'aquifère fracturé les plus importantes dans la zone d'étude ?
- Q37 : Où se situe la vulnérabilité DRASTIC la plus élevée ou la plus faible ?
- Q38 : Quel type d'eau souterraine est le plus répandu dans la zone d'étude ?

d) Activités anthropiques

- Q39 : Quelles sont les villes où l'indice de densité d'activités anthropiques est le plus élevé ou le plus faible dans la zone d'étude ?
- Q40 : Quelles sont les villes ont la plus grande densité ou la plus faible densité d'activités agricoles ?

3.4.2.2. Liste des questions no.2

a) Usage de la ressource en eau souterraine

- Q41 : Pour une MRC ou pour la zone d'étude, quel volume d'eau souterraine a été utilisé par an ?
- Q42 : Quelle MRC qui a la consommation d'eau est la plus importante ou la plus faible ?

b) Qualité de la ressource en eau souterraine

- Q43 : Pour une municipalité / une MRC / la zone d'étude, quelle norme de potabilité est dépassée ?
- Q44 : Pour une municipalité/ une MRC / la zone d'étude, quels sont les dépassements d'objectifs esthétiques les plus souvent observés ?

3.5. Modélisation spatiale du système

La modélisation spatiale consiste à identifier et à délimiter des éléments spatiaux dans l'espace géographique, à représenter ces éléments par des unités graphiques (points, lignes, polygones, etc.) et à les répartir sur différentes couches (Schneuwly, 2013). À ces étapes, les besoins du monde réel sont transformés sous forme de modèles conceptuels, de données à référence spatiale. La modélisation spatiale est réalisée en quatre étapes principales :

- 1) identification des classes d'entités,
- 2) identification des sous-classes d'entités,
- 3) identification des entités,
- 4) identification des attributs.

3.5.1. Classes d'entités

Pour répondre aux besoins des utilisateurs des eaux souterraines, six grandes classes d'entités ont été créées (figure 5) :

- *1.1. Topographie* : question de la section 3.4.1.1.a;
- *1.2. Contextes hydrogéologiques régionaux* : question de la section 3.4.1.1.b;
- *1.3. Conditions hydrogéologiques* : question de la section 3.4.1.1.c;
- *1.4. Activités anthropiques* : question de la section 3.4.1.1.c;
- *2.1 Usage de la ressource* : question de la section 3.4.1.2.a;
- *2.2 Qualité de la ressource* : question de la section 3.4.1.1.b.



Figure 5 - Identification des classes d'entités

3.5.2. Sous-classes d'entités

a) Présentation du territoire à d'étude

La figure 6 est une partie de modèle conceptuel qui représente la sous-classe « Territoire ».



Figure 6 - La sous-classe « Territoire »

- *1.1.1. Topographie* : on traite les courbes de niveau avec une équidistance 20 m.
- *1.1.2. Route, limites municipalités et toponymie* : les principaux éléments sont les réseaux routiers, les limites municipales et les noms des municipalités.
- *1.1.3. Modèle numérique altimétrique* : il s'agit de l'altitude de la surface du sol (m).
- *1.1.4. Pente du sol* : la pente de la surface du sol en degrés est l'élément principal de la couche de données.
- *1.1.5. Hydrographie* : le réseau hydrographique et les noms des principales rivières sont les principaux éléments.

- *1.1.6. Limites des bassins* : les limites des bassins versants de niveau 1 et 2 sont utilisées.
- *1.1.7. Couverture végétale* : les principaux types de végétation forestière présents sur le territoire selon trois type de peuplements : feuillus (plus de 75% de la surface); résineux (plus de 75% de la surface) et; mélangés (de 26% à 75% de résineux).
- *1.1.8. Milieux humides* : la distribution spatiale des milieux humides et la classification de différents types : marais, eaux peu profonde, marécage, prairie humide, tourbière minérotrophe (fen), tourbière ombrotrophe (bog) et tourbière boisée.
- *1.1.9. Pédologie* : la distribution spatiale des types de sol : argileux, loameux, sableux, graveleux, issus de dépôts de tills, organiques ou divers et différenciation des niveaux de drainage pour chaque type de sol : bien drainé, imparfaitement drainé, mal drainé ou inconnu.
- *1.1.10. Occupation du sol* : la classification selon les thèmes suivants : zones agricoles, zones forestières, zones humides, zones urbaines et zones minières.
- *1.1.11. Affectation du territoire* : la distribution spatiale de l'affectation du territoire selon différentes classes (polygones) : conservation, forestière, agroforestière, agricole, récréative, urbaine et industrielle.

b) Contextes hydrogéologiques régionaux

La figure 7 est une partie de modèle conceptuel qui représente la sous-classe « Contextes hydrogéologiques régionaux ».

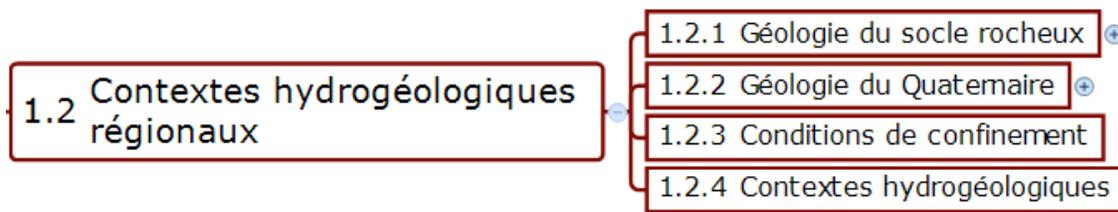


Figure 7 - La sous-classe « Contextes hydrogéologiques régionaux »

- *1.2.1. Géologie du socle rocheux* : elle est décrite par les limites surfaciques des formations rocheuses et la localisation des failles et de plis dans les formations rocheuses.

- *1.2.2. Géologie du Quaternaire*: la localisation des sites visités, coupes géologiques et structures quaternaires ponctuelles (ex. : mine, forage, delta); les structures géomorphologiques de la géologie du Quaternaire (ex. les formes d'accumulation et d'érosion des dépôts : terrasse fluviale ou lacustres, chenal, dune, esker); la localisation des forages et affleurements utilisés pour la modélisation; la distribution spatiale de l'épaisseur des dépôts meubles (m); l'élévation (m) de la surface du socle rocheux par rapport au niveau de la mer.
- *1.2.3. Conditions de confinement* : la distribution spatiale de l'indice (ou condition) de confinement des nappes selon 3 classes : libre, semi-captive et captive.
- *1.2.4. Contextes hydrogéologiques* : la distribution spatiale des types de contexte stratigraphique (superposition de plusieurs types de dépôts : ex. : Argile-Till-Quaternaire ancien).

c) Conditions hydrogéologiques

La figure 8 est une partie de modèle conceptuel qui représente la sous-classe « Contextes hydrogéologiques ».

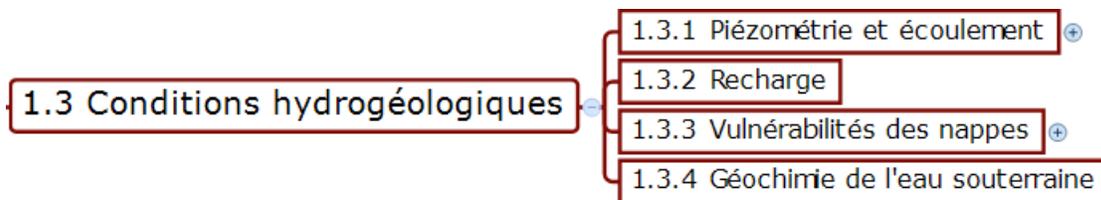


Figure 8 - La sous-classe « Conditions hydrogéologiques »

- *1.3.1. Piézométrie et écoulement* : les points utilisés pour l'interpolation de la piézométrie; isopièzes (courbes d'élévation piézométrique) équidistantes de 50 m; l'élévation (m) du niveau piézométrique du roc fracturé par rapport au niveau de la mer.
- *1.3.2. Recharge* : la distribution spatiale de la recharge moyenne annuelle (1990-2010) en mm/an; la localisation des résurgences d'eau souterraine; la localisation des zones de recharge préférentielle de plus de 200 mm/ an.
- *1.3.3. Vulnérabilités des nappes* : la distribution spatiale de la vulnérabilité de l'aquifère fracturé selon l'indice DRASTIC (niveaux de vulnérabilité de très faible à très élevé).

- 1.3.4. *Géochimie de l'eau souterraine* : les types d'eau sont définis en fonction des concentrations en ions majeurs (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-}).

d) Activités anthropiques

La figure 9 est une partie de modèle conceptuel qui représente la sous-classe « Activités anthropiques ».

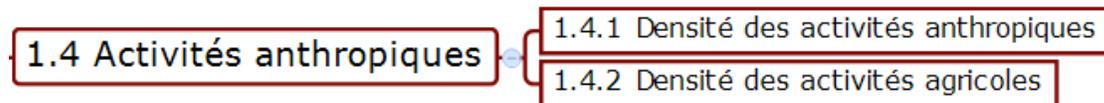


Figure 9 - La sous-classe « Activités anthropiques »

- 1.4.1. *Densité des activités anthropiques*: la distribution spatiale de la densité des activités anthropiques (activité par km^2) et contour du 75^e percentile du risque.
- 1.4.2. *Densité des activités agricoles* : la distribution spatiale de la densité des activités agricoles (ferme par km^2) et contour du 75^e percentile du risque.

e) Ressource en eau souterraine

La figure 10 est une partie de modèle conceptuel qui représente la sous-classe « Usage de la ressource ».

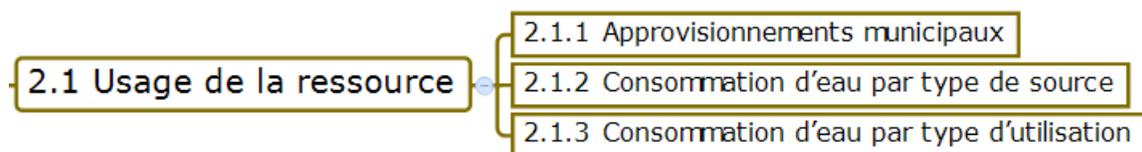


Figure 10 - La sous-classe « Usage de la ressource »

- 2.1.1. *Approvisionnements municipaux* : les types de réseaux d'approvisionnement municipaux (eau souterraine, eau de surface, mixte).
- 2.1.2. *Consommation d'eau par type de source* : des volumes d'eau consommés par MRC selon la provenance de la source (souterraine ou surface) en m^3 .
- 2.1.3. *Consommation d'eau par type d'utilisation* : des volumes d'eau consommés par MRC selon le type d'usage (résidentielle, agricole ou industrielle, commerciale et institutionnelle) en m^3 .

La figure 11 est une partie de modèle conceptuel qui représente la sous-classe « Qualité de la ressource ».

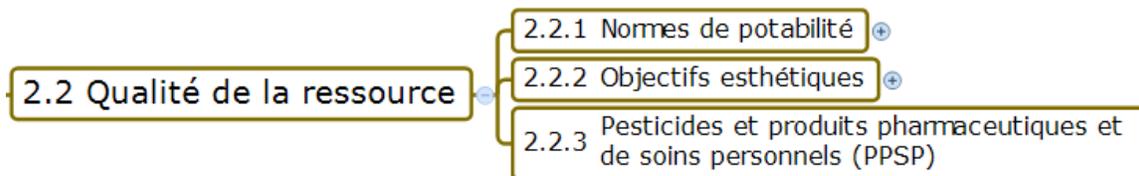


Figure 11 - La sous-classe « Qualité de la ressource »

- 2.1.1. *Normes de potabilité* : la description des données de normes de potabilité a été présentée dans les tableaux des annexes 5, 6 et 7.
- 2.1.2. *Objectifs esthétiques* : la description des données d'objectifs esthétiques a été présentée dans les tableaux de l'annexe 8.
- 2.1.3. *Pesticides et produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP)* : la description des données de PPSP a été présentée dans les tableaux des annexes 9 et 10.

3.5.3. Entités

À la suite de l'identification de classes d'entités et sous-classes, les entités ont été identifiées pour répondre aux besoins et aux questions des utilisateurs. Chacune des entités est unique et classée à l'intérieur d'une classe ou sous-classe d'entité. Le type de données pour chacune des entités peut être vectoriel (point, ligne, polygone) ou matriciel. La figure 12 est un exemple de décomposition des quatre niveaux pour l'entité « Agriculture » afin de répondre aux questions suivantes :

- Quel est le type de culture de l'endroit X ou de la région Y ?
- Quel type de culture est le plus/ moins répandu dans la zone d'étude ?
- Où se situe le type de culture le plus/ moins répandu ?

La liste des entités a été présentée complètement dans l'annexe 4.

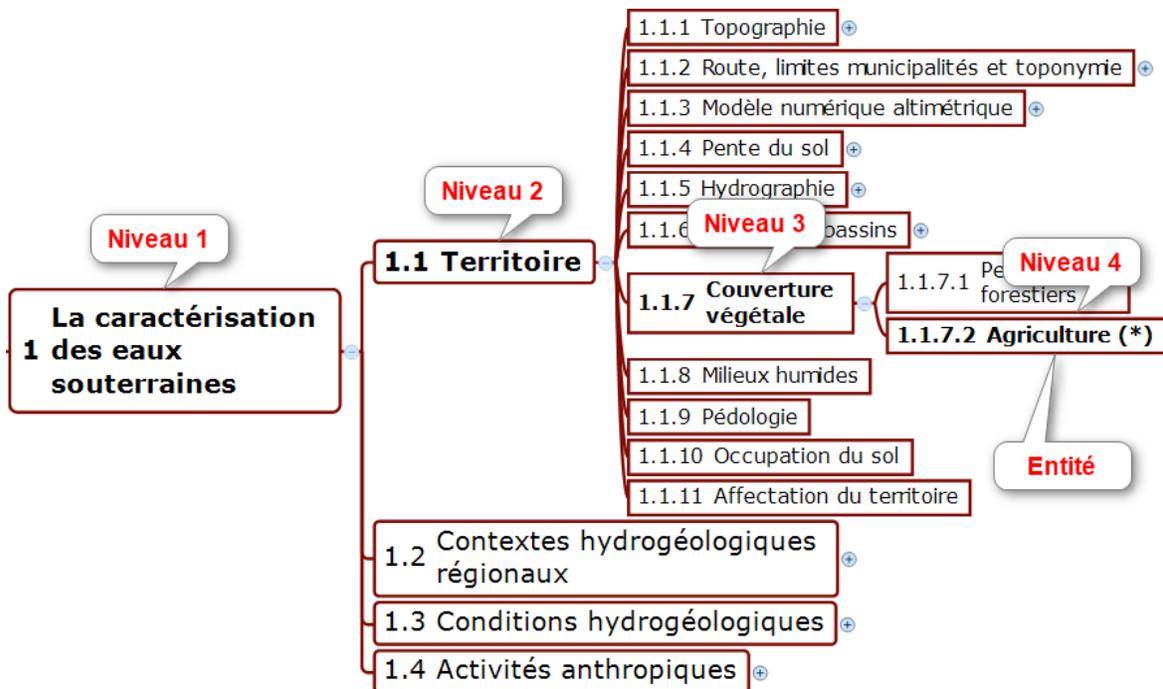


Figure 12 - Un exemple de décomposition des quatre niveaux pour l'entité « Agriculture »

3.5.4. Attributs et sous-attributs

Pour chaque entité créée, il faut identifier une liste d'attributs uniques. En se basant sur les caractéristiques de l'entité, ces attributs ont été créés. Pour chaque entité, normalement il y a des attributs généraux et des attributs uniques. Le tableau 2 représente un exemple de décomposition de l'entité « agriculture » en attributs. Les attributs généraux sont : « shape », « shape_Length », « shape_Area ». Ce sont les informations spatiales de l'entité. Dans ce cas, l'attribut unique est « type_culture » qui permet de répondre aux besoins et aux questions des utilisateurs. Pour les autres entités, les attributs ont été identifiés de la même façon.

Tableau 2 - Exemple de décomposition d'une entité en attributs et sous-attributs : l'entité «Agriculture »

ID	Entité	Attributs	Sous-attributs
1.1.7.2	Agriculture	shape	Polygon
		shape_Length	
		shape_Area	
		type_culture	Céréales
			Foin
			Cultures mixtes
			Maraîcher
			Petits fruits
			Cannebergières
			Pas d'information

3.6. Choix de la méthode de développement du SCDM

3.6.1. Environnement de développement et d'exploitation

Le développement du SCDM est basé sur l'architecture de trois couches (3-Tiers) : la couche présentation, la couche métier ou *business* et la couche accès aux données. Le SCDM utilise totalement des technologies libres et ouvertes qui font l'objet de la figure 15.

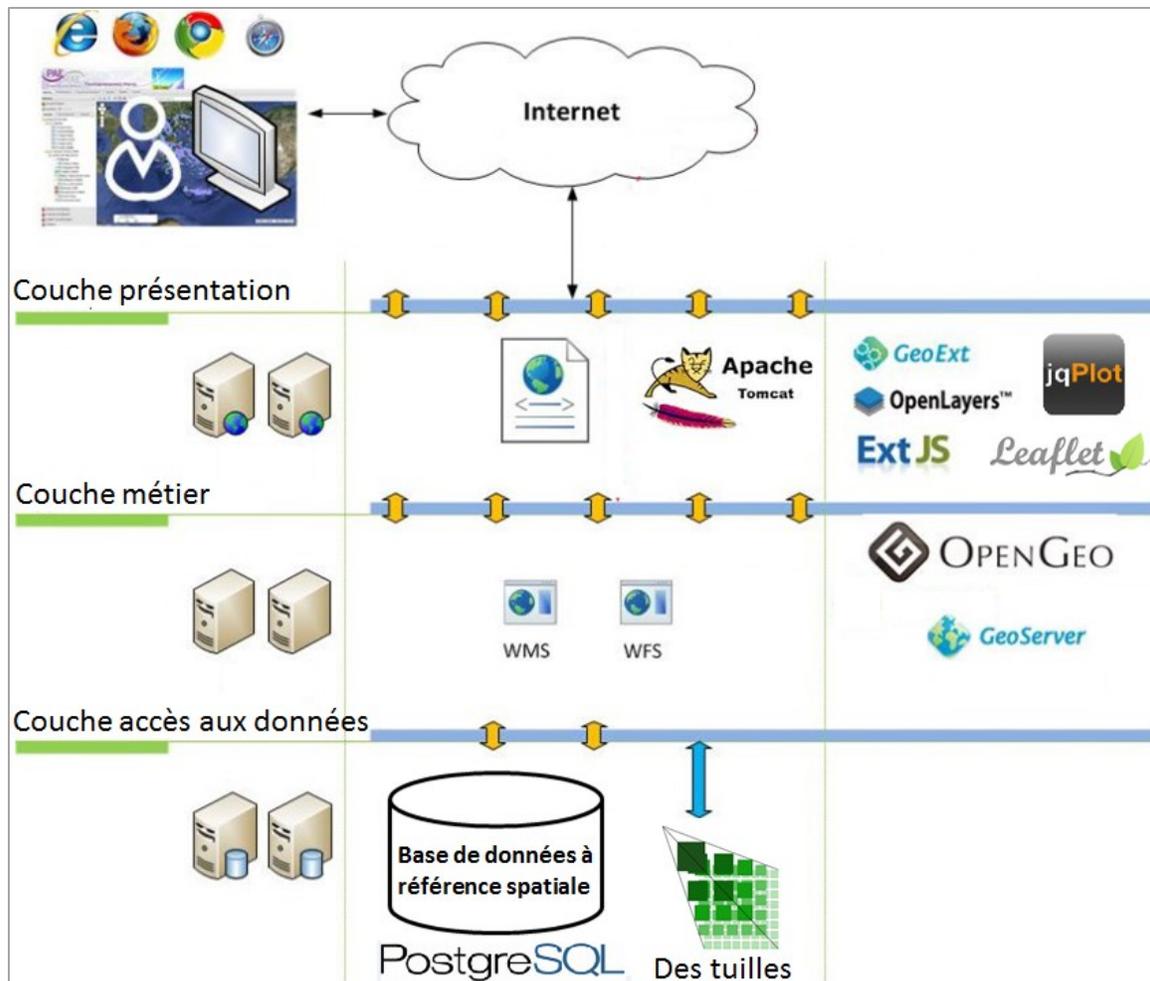


Figure 13 - Architecture de trois couches (3-Tiers) pour le développement du SCDM

Les langages de programmation orientés sur le Web sont Groovy, HTML, XML, Javascript, Ajax. Toutes les solutions de technologie choisies pour ce projet sont basées sur l'environnement J2EE/ Spring/ Hibernate.

Le système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR) choisi est PostgreSQL, une structure de base de données robuste qui permet de manipuler les données à référence spatiale. Elle offre la plus complète des fonctionnalités de l'OGC (Steiniger et Hunter, 2012).

Le serveur cartographique GeoServer a été choisi pour la génération des couches cartographiques. Il permet d'avoir une bonne gestion des couches et des droits

d'utilisation associés. GeoServer est compatible avec le serveur de déploiement Apache Tomcat choisi comme serveur de déploiement du système.

Les services WMS et WFS sont de bonnes solutions pour diffuser les données à référence spatiale entre la couche métier et la couche présentation.

OpenLayers, ExtJS, GeoExt, jqPlot, Leaflet sont les bibliothèques de développement pour la construction des applications de cartographie dans un navigateur. GeoExt combine les avantages des bibliothèques JavaScript, OpenLayers, et ExtJS. OpenLayers est utilisé pour les fonctionnalités de cartographie Web. ExtJS est utilisé pour les nombreux widgets de l'interface utilisateur. Ces deux bibliothèques sont utilisées pour obtenir un outil complet qui permet de créer des applications de cartographie Web riches et hautement interactives (GeoExt Community, 2015). GeoExt, ExtJS et Openlayers sont utilisés pour développer le module de carte interactive. JqPlot est une bibliothèque Javascript libre qui permet de produire de belles lignes et barres (Leonello, 2015). JqPlot et Leaflet sont utilisés pour créer des histogrammes et des cartes dans le module d'atlas multiéchelle.

3.6.2. Cartographie dynamique

Un système de cartographie dynamique a été développé pour répondre aux besoins et aux questions des utilisateurs de l'eau. Le développement de ce système comprend les trois étapes principales suivantes :

- (1) Configurer un système de gestion de base de données : cette étape consiste à transférer les données vectorielles dans une base de données à référence spatiale avec le SGBDR PostgreSQL.

- (2) Configurer le serveur cartographique en mode WMS/WFS pour chaque couche avec un style d'affichage prédéfini en format *Styled Layer Descriptor* (SLD) : GeoServer est le serveur cartographique utilisé pour la cartographie dynamique. Il peut communiquer avec la base de données dans PostgreSQL pour avoir des

données nécessaires pour la production de la carte demandée. GeoServer offre la possibilité de prendre directement les données d'une table dans la base de données pour définir une couche cartographique. De plus, GeoServer offre la possibilité de créer une feuille de style SLD en définissant l'apparence d'affichage de la couche. C'est une feuille de script XML qui définit le style associé à la couche comme la couleur, la forme, la taille d'objet dans la couche.

- (3) Créer une interface cartographique pour l'affichage des couches : GeoExt permet de créer les outils tels que les arbres de couche, les barres d'outils de navigation, les légendes des couches, etc. OpenLayers permet de charger, d'afficher, et de rendre des couches sur le navigateur Web.

3.6.3. Atlas multiéchelle

Un atlas multiéchelle a été développé pour répondre aux besoins et aux questions des gestionnaires du territoire. L'approche multiéchelle et la présentation des cartes selon la méthode dite « de forage » (ce terme représente le passage d'un découpage administratif ou d'un découpage hydrologique à un autre, et n'a aucun lien avec le forage d'un puits pour la recherche d'eau souterraine) par un simple clic seront intégrées au processus de navigation (ex.: atlas de l'emploi de Bénié *et al.*, 2008). La méthodologie d'analyse spatiale multiéchelle est représentée par les trois niveaux d'affichage (figure 13) :

- zone d'étude (niveau 1),
- MRC pour le type de carte administrative ou de bassin versant pour le type de carte hydrographique (niveau 2),
- municipalité pour le type de carte administrative ou de sous-bassin versant pour le type de carte hydrographique (niveau 3).

Les détails de cette structure sont expliqués clairement dans la section 4.2.4.

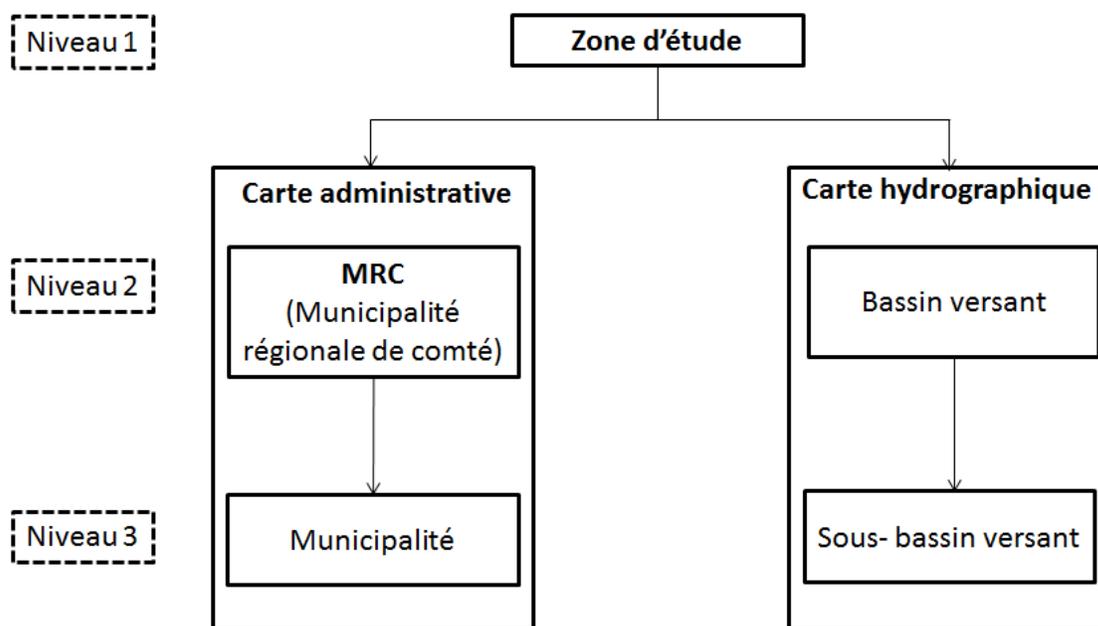


Figure 14 - Schéma de l'atlas multiéchelle

Les indicateurs de qualité tels que la norme de potabilité, la concentration en nitrates des eaux souterraines, les pesticides, les PPSP dans les eaux souterraines de la zone d'étude, ont été suivis. Les informations des indicateurs de qualité de l'eau sont présentées en détail à la figure 14.

La consommation de l'eau souterraine et les indicateurs de la qualité de l'eau ont été représentés sous forme d'atlas multiéchelle. Les résultats du développement d'atlas multiéchelle ont été présentés dans la section 4.2.4.

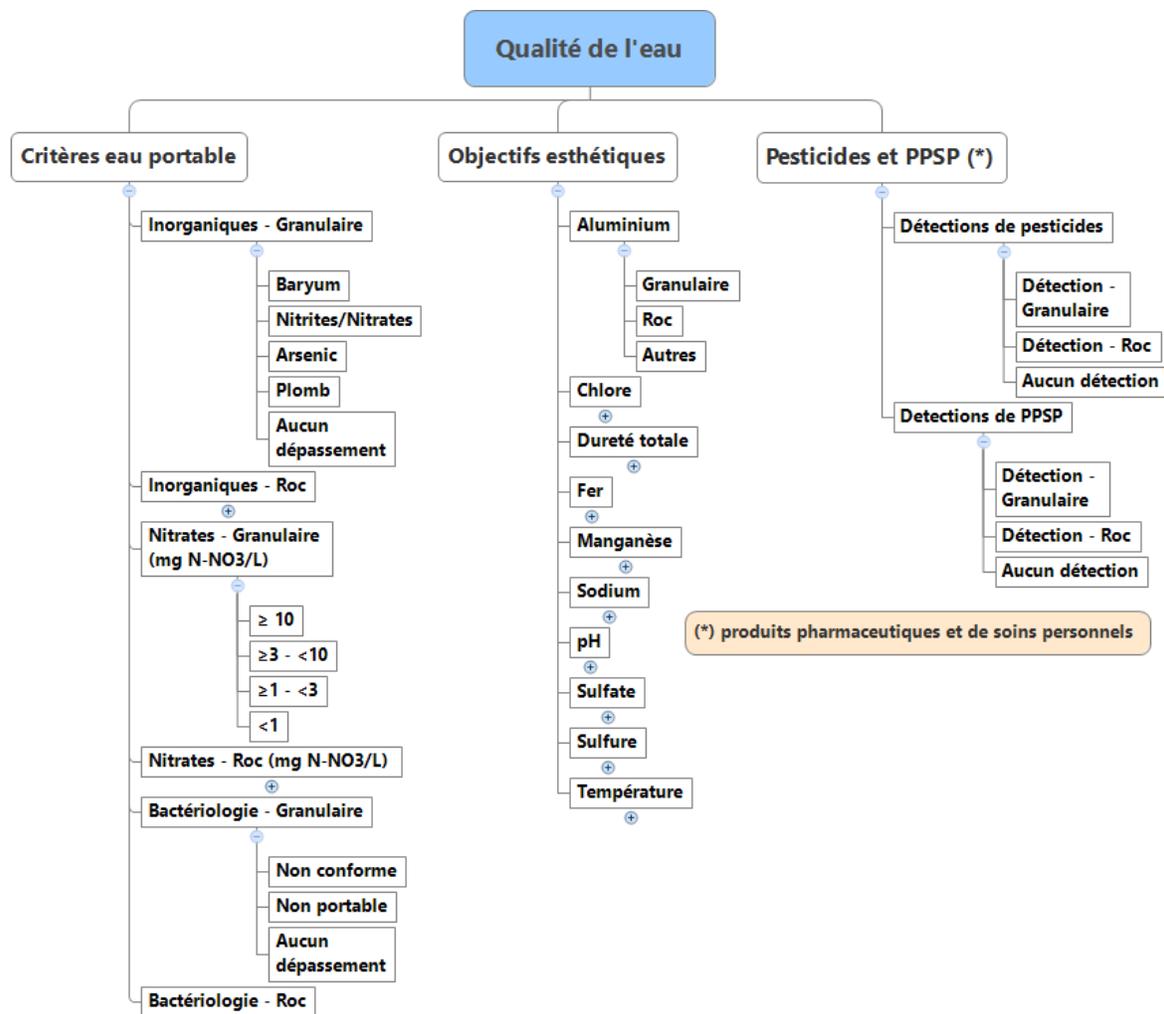


Figure 15 - L'indicateur de la qualité de l'eau

4. Résultats

4.1. La base de données à référence spatiale

Une base de données à référence spatiale a été créée dans un système de gestion de base de données relationnelle Postgresql/PostGIS. Cette base de données comprend deux catégories de données : les données spatiales et les données non-spatiales qui ont été collectées dans la zone d'étude (figure 16).

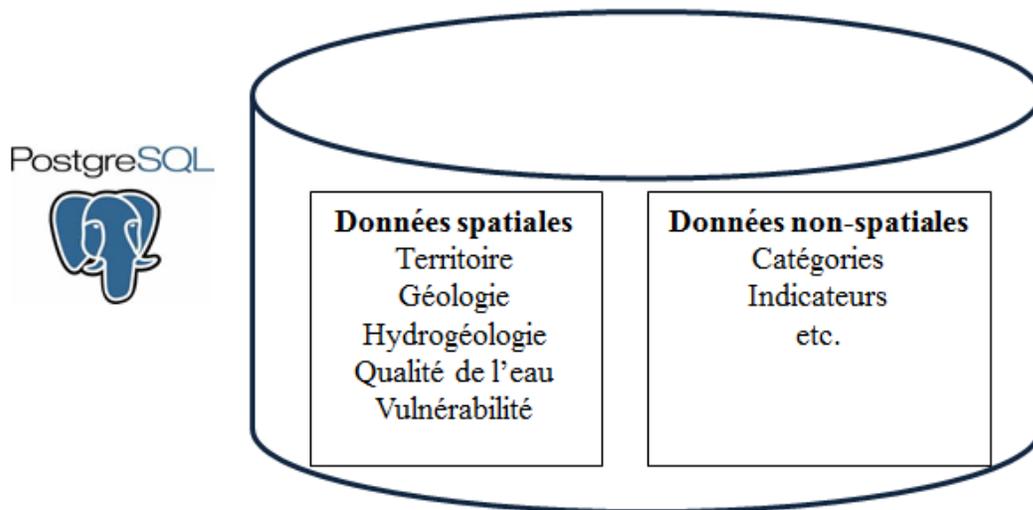


Figure 16 - La structure de la base de données à référence spatiale

4.2. L'interface de diffusion cartographique

4.2.1. La page d'accueil

Le système de cartographie dynamique multiéchelle (SCDM) comprend trois modules (figure 17) :

- (1) Carte thématique;
- (2) Carte interactive;
- (3) Atlas multiéchelle.

carte courante. Les utilisateurs peuvent choisir et diffuser facilement la carte souhaitée (figure 18).

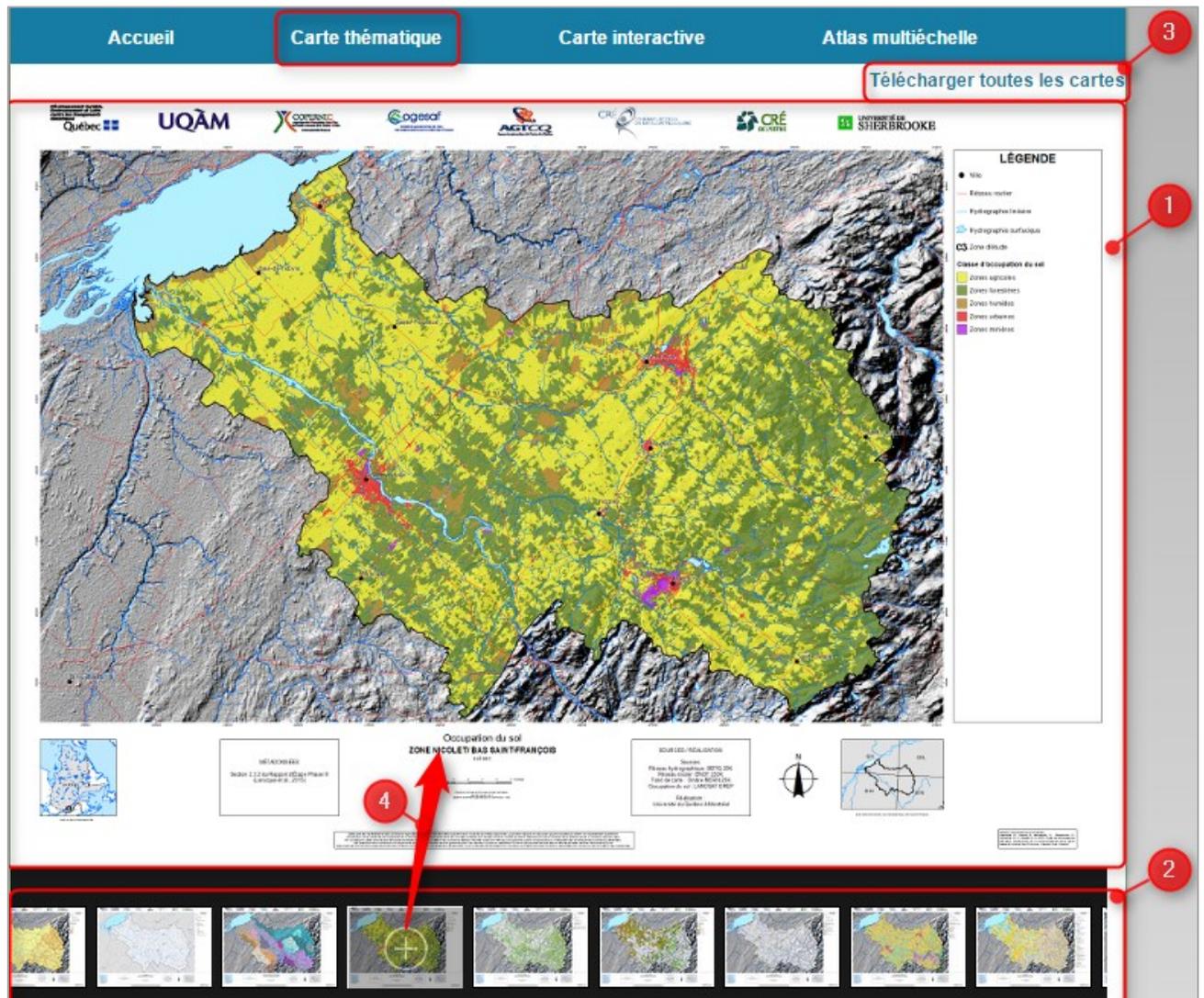


Figure 18 - Représentation du « module des cartes thématiques » pour l'occupation du sol

- (1) la carte principale;
- (2) la liste des cartes disponibles (35 livrables du projet PACES-NSF);
- (3) le lien permet de télécharger toutes les cartes disponibles sous format pdf.
- (4) choisir une carte dans la liste des cartes de base et cliquer sur cette carte pour qu'elle devienne la carte principale.

4.2.3. Module de cartes interactives

Un module de cartes interactives a été développé dans le cadre de ce projet. C'est un module de cartographie dynamique qui permet de représenter automatiquement les 35 cartes thématiques du projet PACES-NSF avec leur légende et leur habillage (selon les normes de sémiologie graphique). L'effet de zoom et la présentation des cartes sont intégrés au processus de navigation. La carte interactive est au centre de l'application. La liste des cartes est située à gauche de la carte comme présentée dans la figure 19. Le panneau de gauche affiche les couches de chaque carte courante avec leur légende. La liste de couches a été créée en se basant sur le modèle conceptuel pour répondre aux besoins et aux questions des utilisateurs (la section 3.5). La barre d'outils est située en haut de la carte. Le module affiche des outils pour interagir avec la carte : zoom avant, zoom arrière, mesure de la distance, mesure de la surface.

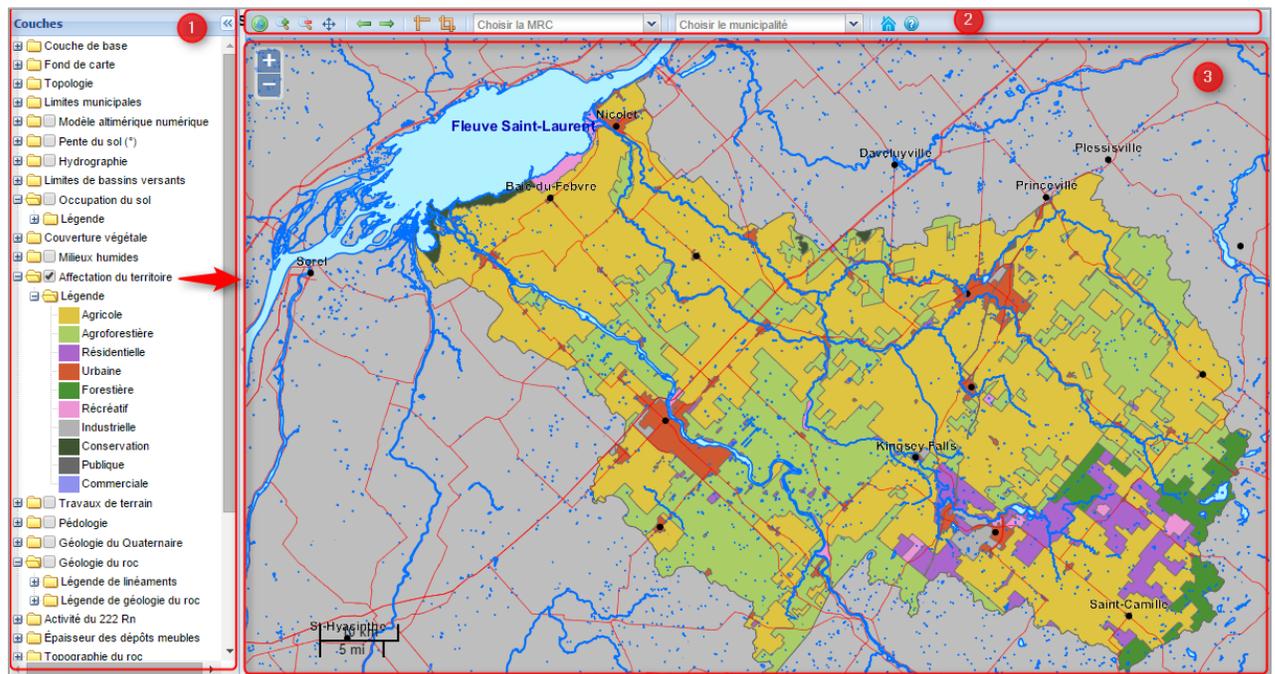


Figure 19 - Représentation du « module des cartes interactives » pour l'affectation du territoire

- (1) Le panneau de gauche : la liste des cartes avec des couches (l'information plus détaillée dans le tableau 3);
- (2) La barre d'outils;
- (3) La carte.

Tableau 3 - Liste des cartes avec des couches

Catégories	Couches
Couche de base	- Zone d'étude
Fond de carte	<ul style="list-style-type: none"> - Ville - Réseau routier - Hydrographie linéaire - Hydrographie surfacique
Topographie	- Courbes de niveau (équidistance 20 m)
Limites municipales et toponymie	<ul style="list-style-type: none"> - MRC - Toponymie de MRC - Municipalités - Toponymie de municipalité
Modèle altimétrique numérique	- Modèle altimétrique numérique
Pente du sol	- Pente du sol
Hydrographie	- Hydrographie linéaire (détails)
Limites de bassins et de sous-bassins	<ul style="list-style-type: none"> - Bassin versant de niveau 1 - Sous-bassins de la rivière Nicolet - Sous-bassins de la rivière Nicolet Sud-Ouest - Sous-bassins de la rivière Saint-François
Occupation du sol	- Occupation du sol
Couverture végétale	<ul style="list-style-type: none"> - Peuplements forestiers - Agriculture
Milieux humides	- Milieux humides
Affectation du territoire	- Affectation du territoire
Pédologie	- Pédologie
Géologie du Quaternaire	<ul style="list-style-type: none"> - Géomorpho points - Géomorpho lignes - Dépôts quaternaires
Géologie du socle rocheux	<ul style="list-style-type: none"> - Géologie du roc - Linéaments
Épaisseur des dépôts meubles	<ul style="list-style-type: none"> - Forages et affleurements utilisés - Épaisseur

Catégories	Couches
Topographie du roc	- Élévation de la surface du roc
Conditions de confinement	- Indice de confinement
Géochimie de l'eau souterraine	<ul style="list-style-type: none"> - Type d'eau pour l'aquifère au roc - Activité du 222 Rn dans les eaux souterraines - Activité du 222 Rn dans les eaux de surface
Contextes hydrogéologiques	- Contextes hydrogéologiques
Piézométrie dans le roc	<ul style="list-style-type: none"> - Points utilisés pour l'interpolation - Isopièthes (intervalle 50m) - Élévation piézométrique (m)
Vulnérabilité de l'aquifère du roc régional	- Indice DRASTIC
Activités potentiellement polluantes	<ul style="list-style-type: none"> - Densité des activités anthropiques - Densité des activités agricoles
Utilisation de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> - Approvisionnements municipaux - Consommation d'eau par type de source - Consommation d'eau par type d'utilisation
Réseau de suivi météorologique, hydrologique, piézométrique	<ul style="list-style-type: none"> - Station piézométrique - Station hydrométrique - Station météorologique
Zones de recharge	<ul style="list-style-type: none"> - Résurgence - Zone de recharge préférentielle - Recharge spatialisée

La barre d'outils

 Revenir à l'étendue initiale de la carte

 Zoom avant

 Zoom arrière

 Déplacement sur la carte

 Affichage précédent

 Affichage suivant

 Mesurer distance

 Mesurer superficie

 Page d'accueil

 Guide d'utilisation

naviger vers une MRC souhaitée

naviger vers une municipalité souhaitée

4.2.4. Module d'atlas multiéchelle

Le module d'atlas multiéchelle a été réalisé pour représenter le résultat de requête spatiale sous forme de carte dynamique. La figure 20 représente la structure de carte multiéchelle pour la zone d'étude. La limite de la zone d'étude est représentée sur la figure 20 (cas 1 en bleu). Deux types de cartes peuvent être choisis: carte administrative et carte hydrographique.

Les cartes administratives utilisent le découpage administratif de la région Centre-du-Québec. L'utilisateur débute par la région ou la zone d'étude (figure 20 – case 1), en suite en forant, il dispose d'une vision au niveau des MRC (figure 20 – case 2). En forant encore, il dispose d'un portrait au niveau des municipalités (figure 20 – case 3). La couleur de chaque zone est déterminée par la valeur de la population correspondant à cette zone.

Les cartes hydrographiques sont basées sur les limites des bassins versants. Le principe de leur utilisation est identique à celui présenté au volet précédent. La différence est que l'utilisateur débute par la région, ensuite il dispose d'une vision au niveau des bassins

versants (figure 20 – case 4), et peut ainsi se rendre jusqu’aux sous-bassins versants (figure 20 – case 5). La couleur de chaque zone est déterminée par la valeur de la superficie correspondante à cette zone. L’utilisateur peut ajouter une information sur ces couches de base qui concernent les puits. La figure 16 montre la localisation des puits avec leurs caractéristiques.

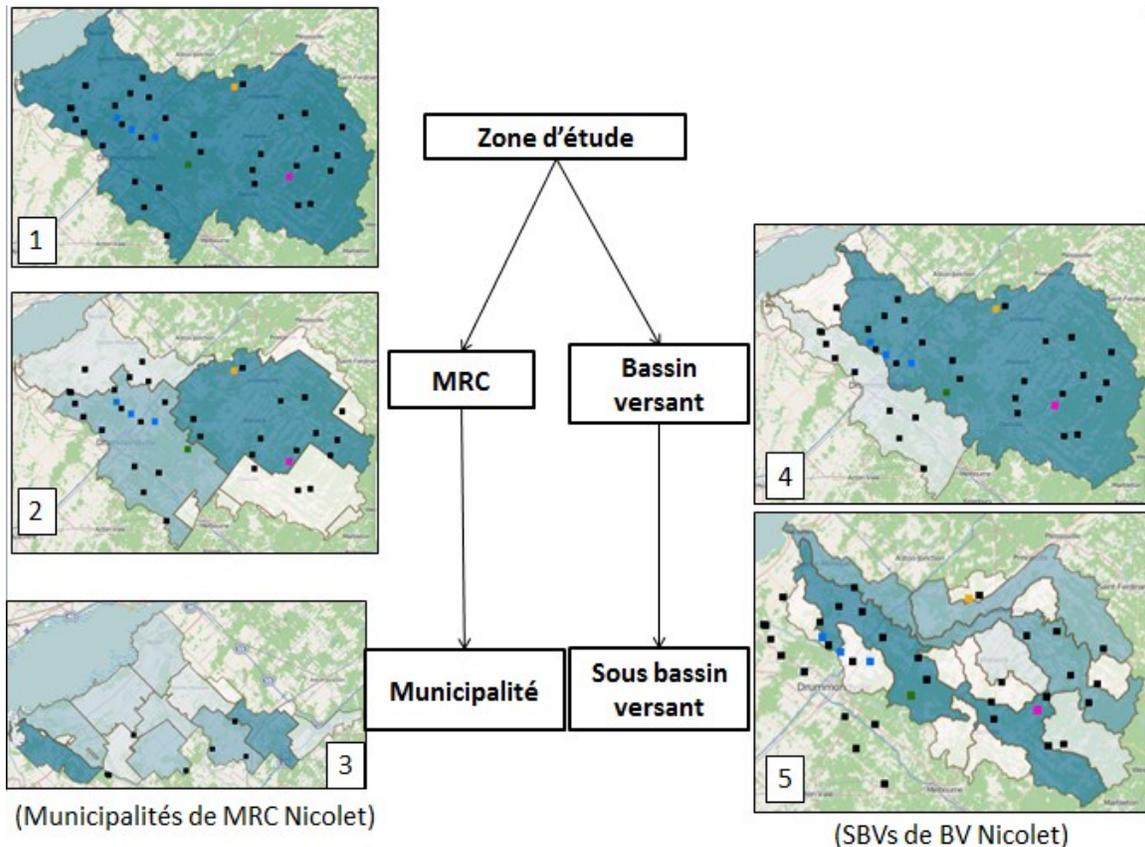


Figure 20 - Structure de carte multiéchelle pour la zone d'étude

La figure 21 illustre les différents volets de l’atlas multiéchelle : la carte, le tableau et l’histogramme pour représenter les données géomatiques. La couleur de chaque zone est déterminée par la valeur des données correspondant à cette zone. La carte, le tableau et l’histogramme représentent la même information d’une manière différente. Les gestionnaires du territoire utilisent beaucoup ce type d’outils aussi nommés « tableaux de bord ». Les différentes représentations de l’information permettent à un gestionnaire de prendre la décision la plus juste possible. L’aspect dynamique apporté par l’atlas multiéchelle permet aussi au gestionnaire de prendre une décision en fonction de la région ou de la sous-région.

Dans la zone d'étude, il y a environ 200 puits ayant été échantillonnés pour analyser la qualité de l'eau. Le module d'atlas multiéchelle permet d'afficher les informations concernant la qualité de l'eau liée à ces puits.

L'atlas a été pensé pour que le gestionnaire puisse afficher des indicateurs sur la qualité de l'eau (ex.: les critères de l'eau potable ou bien les objectifs esthétiques) quelle que soit l'échelle de représentation (figure 21). Les statistiques et les données correspondant à chaque catégorie sont récupérées automatiquement à partir de la base de données du SCDM.

- 1) Normes de potabilité : les annexes 5, 6 et 7;
- 2) Objectifs esthétiques : l'annexe 8
- 3) Pesticides et produits pharmaceutiques et de soins personnels : les annexes 9 et 10.

La figure 21 présente le « module d'atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau MRC. Les annexes 11 et 12 illustrent la représentation de ce module pour la carte administrative au niveau zone d'étude et au niveau municipalité. Ce module permet aux gestionnaires du territoire d'avoir une vision régionale sur les eaux souterraines.

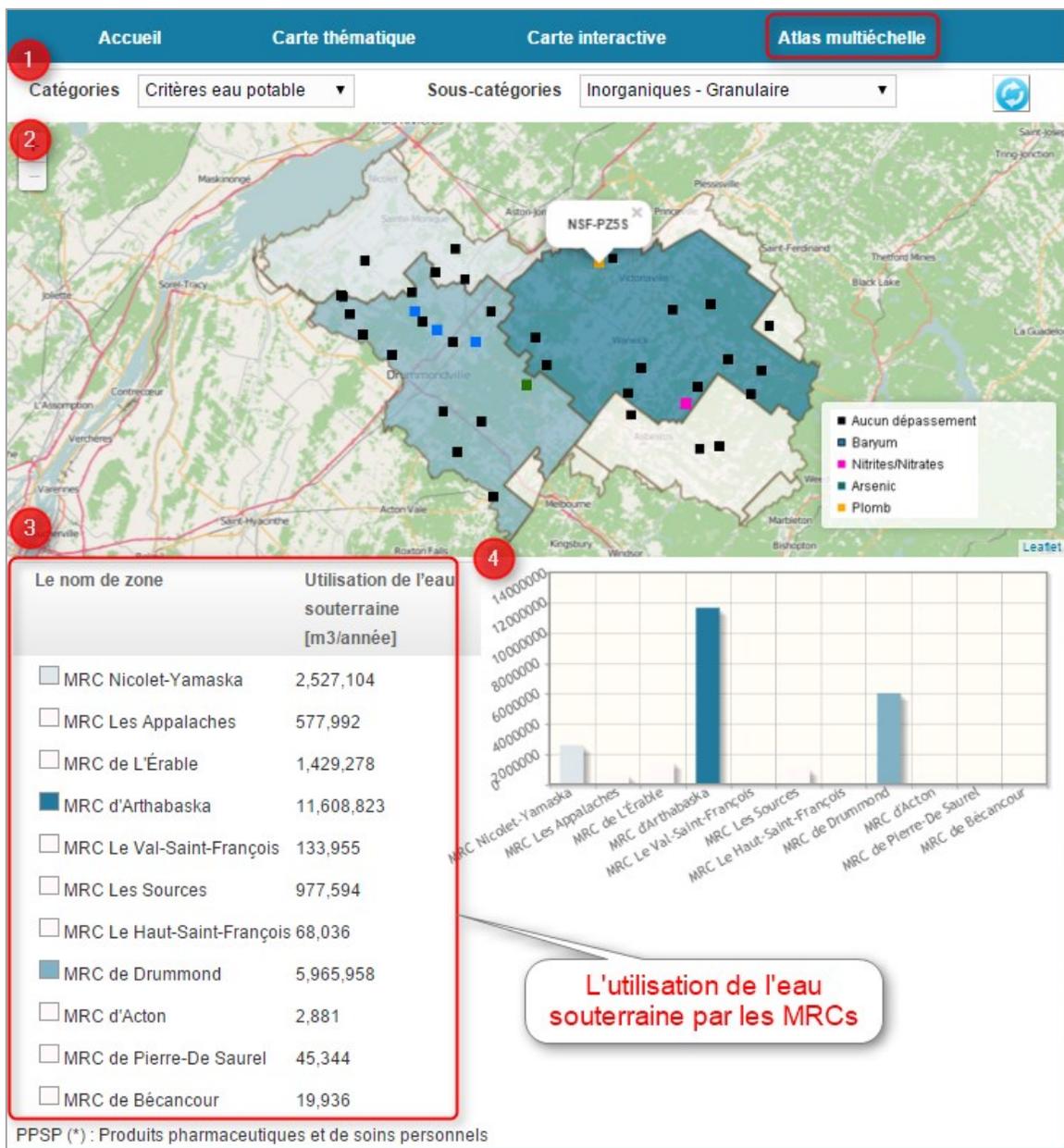


Figure 21 - Représentation du « module d'atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau de MRC

- (1) catégories, sous-catégories : au sujet de la qualité de l'eau;
- (2) la carte avec sa légende;
- (3) le tableau;
- (4) l'histogramme.

4.3. Mise en opération du système

Les résultats de ce projet de maîtrise ont été présentés lors d'une réunion portant sur les résultats finaux du projet PACES-NSF qui a été organisée le 17 juin 2015 à Drummondville. Des commentaires positifs ont été exprimés par les partenaires pour le SCDM. Dans la prochaine étape, le SCDM sera vérifié par l'équipe de réalisation du projet PACES-NSF à l'Université du Québec à Montréal et les partenaires suivant du projet :

- Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet (COPERNIC);
- Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF);
- Agence de Géomatique du Centre-du-Québec (AGTCQ);
- les Conférences régionales des élus (CRÉ Centre-du-Québec);
- un ensemble de partenaires municipaux des MRC d'Arthabaska, de l'Érable, de Drummond, de Nicolet-Yamaska et des Sources.

Le système dans sa version finale sera diffusé sur Internet après concertation avec tous les partenaires.

5. Analyse et discussion des résultats

L'un des principaux avantages du SCDM est qu'il est convivial. Il a été conçu pour s'inscrire dans le même ordre d'idées que les tableaux de bord généralement utilisés par un gestionnaire du territoire. L'atlas met l'accent sur l'information en contournant les contraintes des technologies utilisées, comme la géomatique. Le projet de recherche visait deux objectifs :

- Synthétiser les connaissances des eaux souterraines de la zone d'étude du PACES dans une base de données à référence spatiale;
- Concevoir et développer un système de cartographie dynamique multiéchelle en ligne sur la caractérisation des eaux souterraines.

Pour le premier objectif, la solution proposée permet aux acteurs des eaux souterraines de publier et de diffuser des connaissances acquises dans le domaine. Les trois volets de l'atlas permettent notamment d'offrir une bibliothèque de cartes, des cartes interactives comprenant autour de 35 couches et un atlas multiéchelle permettant d'illustrer spatialement les informations disponibles sur l'eau souterraine. Cet objectif est largement atteint.

Pour le deuxième objectif, le défi était d'intégrer l'aspect multiéchelle dans la gestion des eaux souterraines. Le travail réalisé a permis de concevoir et développer un outil convivial et utilisable par un gestionnaire ne disposant d'aucune connaissance en géomatique. Cet objectif est aussi atteint, car l'atlas s'approche d'un tableau de bord de gestion qui pourrait même être utilisé pour diffuser des informations vers le public.

Une fois déployé, cet atlas sera un outil convivial et utile pour les acteurs du milieu des eaux souterraines et il permettra certainement d'améliorer le plan de gestion des eaux souterraines. Pour les experts des eaux souterraines, cet outil leur permettra de diffuser et de publier leurs résultats. L'atlas proposé permettra de toucher un grand nombre de personnes dans un temps très court. Des événements récents sur les problèmes d'eau potable ont montré que les pouvoirs publics ont besoin de diffuser de l'information précise sur la qualité de l'eau. Ces événements ont aussi indiqué que le temps est un facteur important dans la gestion d'une crise.

Les objectifs visés par ce projet de recherche étaient essentiellement la diffusion de l'information. L'atlas pourrait être encore amélioré sur le volet gestion ou administration des données. Ce volet comporte un travail considérable qui n'était pas l'objectif de ce projet. Actuellement la solution permet aux géomaticiens de mettre à jour les données sur les cartes numériques. Il serait certainement intéressant de rendre accessible le volet administration. Ce volet administration permet à l'administrateur du système de mettre à jour les données sur une interface du système en ligne. Ceci nécessitera encore de l'analyse et du développement et pourrait faire l'objet d'un autre projet de recherche.

6. Conclusion et recommandations

L'objectif de ce projet de recherche était de résoudre la problématique de la diffusion des résultats du projet PACES-NSF par un système de cartographie dynamique multiéchelle (SCDM). Cet objectif a été atteint. Toutes les cartes produites dans ce projet ont été représentées sous la forme d'une interface cartographique en ligne. Après la diffusion de ces cartes sur Internet, un grand nombre d'utilisateurs de l'eau souterraine dans la zone d'étude pourront découvrir les résultats du projet PACES-NSF dans leur région. Ils pourront par exemple connaître la consommation d'eau et la qualité de l'eau souterraine dans leur MRC. En conséquence, ils pourront comprendre comment leurs comportements influencent la qualité de l'eau et la quantité d'eau disponible.

La méthodologie utilisée est efficace pour développer un système qui permet d'intégrer les données à référence spatiale sur les eaux souterraines et de diffuser visuellement les résultats spécifiques du projet PACES-NSF sur Internet. Grâce à cette approche multiéchelle, le SCDM pourra permettre aux acteurs de l'eau et aux gestionnaires du territoire d'avoir une vision régionale sur les informations et les caractéristiques des eaux souterraines.

Les logiciels libres et ouverts utilisés dans ce projet sont des choix appropriés, efficaces et spécialement économiques. Le prototype développé a démontré que les technologies libres et ouvertes sont capables de répondre positivement aux exigences du projet, et ont aussi performantes que les solutions commerciales pour répondre aux attentes des partenaires.

Grâce aux interactions avec l'équipe de réalisation du projet PACES-NSF et les partenaires du milieu, nous avons compilé les besoins de tous les intervenants et les données acquises sur les eaux souterraines, ce qui a permis de concevoir et développer le SCDM. Cet outil de cartographie dynamique facilitera l'intégration des données hydrogéologiques dans la planification territoriale et l'appropriation des données par les acteurs régionaux.

Il est recommandé de poursuivre le développement de cet outil dans le cadre des études pour les autres bassins versants ainsi que pour les études des eaux de surface. Au niveau technologique, tous les modules développés peuvent être facilement transférés à l'autre zone d'étude. Le défi de transférer l'outil est l'adaptation avec les données spécifiques dans chaque projet. Les données doivent être organisées et normalisées dans une base de données spatiale.

7. Références

Abdalla, F. (2012) Mapping of groundwater prospective zones using remote sensing and GIS techniques: A case study from the Central Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 70, p. 8-17.

Barker, A.A., Riddell, J.T.F., Slattery, S.R., Andriashek, L.D., Moktan, H., Wallace, S., Lyster, S., Jean, G., Huff, G.F., Stewart, S.A. and Lemay, T.G. (2011) Edmonton–Calgary Corridor groundwater atlas. Energy Resources Conservation Board, ERCB/AGS Information Series 140, 90 p.

Bénié, G.B. (2002) Système d'information géographique. Note de cours, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Bénié, G.B., Voirin, Y., Rousseau, K., Desbiens, Rémy., Dery, J.P. (2008) L'ATLAS Emploi Centre-du-Québec, Québec, Canada. Consulté en ligne : <http://www.atlas-emploi-centreduquebec.com/pub/>

Blanchon, D. (2013) Atlas mondial de l'eau : défendre et partager notre bien commun. Collection Atlas-monde, Ed. Autrement, Paris, 96 p. ISBN : 978-2-7467-3371-8.

Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoit, N., Vigneault, H., Beaudry, C., Malet, X., Laurencelle, M., Gosselin, J.-S., Ladevèze, P., Thériault, R., Beaudin, I., Michaud, A., Pugin, A., Morin, R., Crow, H., Gloaguen, E., Bleser, J., Martin, A., Lavoie, D. (2013) Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, rapport final INRS R-1433, soumis en juin 2013.

CERM-PACES (2013) Résultats du programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de la région Saguenay-Lac-Saint-Jean. Centre d'études sur les ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi.

CERM-PACES (2015) Résultats du programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de Charlevoix, Charlevoix-Est et La Haute-Côte-Nord. Centre d'études sur les ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi.

Chang, Y.S., Park, H.D. (2004) Development of a web-based Geographic Information System for the management of borehole and geological data. *Computers & Geosciences*, vol. 30, n°8, p. 887-897.

Cloutier, V., Blanchette, D., Dallaire, P.-L., Nadeau, S., Rosa, E., et Roy, M. (2013). Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 1). Rapport final déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Rapport de recherche P001. Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Institut de recherche en mines et en

environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 135 p., 26 annexes, 25 cartes thématiques (1:100 000).

Cloutier, V., Rosa, E., Nadeau, S., Dallaire, P.-L., Blanchette, D., et Roy, M., (2015). Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 2). Rapport final déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Rapport de recherche P002.R3. Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Institut de recherche en mines et en environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 313 p., 15 annexes, 24 cartes thématiques (1:100 000).

Comeau, G., Talbot Poulin, M.C., Tremblay, Y., Ayotte, S., Molson, J., Lemieux, J.M., Montcoudiol, N., Therrien, R., Fortier, R., Therrien, P., Fabien-Ouellet, G. (2013). Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais, Rapport final. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, juillet 2013, 148 pages, 24 annexes, 25 cartes.

Free Software Foundation (2015) GeoServer. Consulté en ligne : <http://geoserver.org/>

GeoExt Community (2015) GeoExt. Consulté en ligne : <http://geoext.org/>

Han, W., Yang, Z., Di, L., and Mueller, R. (2012) CropScape: A Web service based application for exploring and disseminating US conterminous geospatial cropland data products for decision support, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 84, p.111-123.

Iosifescu-Enescu, I., Hugentobler, M. and Hurni, L. (2010) Web cartography with open standards – A solution to cartographic challenges of environmental management. *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, n° 9, p. 988-999.

Jha, M. and Peiffer, S. (2006) *Applications of Remote Sensing and GIS Technologies in Groundwater Hydrology: Past, Present and Future*. Bayreuth, Germany, BayCEER, 201 p. ISBN-10: 3-00-018890-8.

Jha, M.K., Chowdhury, A., Chowdary, V.M., Peiffer, S. (2007) Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. *Water Resources Management*, vol.21, p. 427–467

Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L., Meyzonnat, G. (2013). Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs. 219 p.

Larocque, M., Gagné, S., Barnetche, D., Meyzonnat, G, Graveline, M. H. et Ouellet, M. A. (2015a) Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport déposé au

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 258 p.

Larocque, M., Meyzonnat, G., Ouellet, M. A., Graveline, M. H., Gagné, S., Barnetche, D. et Dorner, S. (2015b). Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone de Vaudreuil-Soulanges - Rapport scientifique. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques. 202 p.

Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Vigneault, H., Beaudry, C., Berthot, L., Légaré-Couture, G., Parent, M., Laurencelle, M., Malet, X., Therrien, A., Michaud, A., Desjardins, J., Drouin, A., Cloutier, M.H., Grenier, J., Bourgault, M.-A., Larocque, M., Pellerin, S., Graveline, M.-H., Janos, D. et Molson, J. (2015) Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Rapport final INRS R-1580, soumis au MDDELCC en mars 2015.

Leblanc, Y., Légaré, G., Lacasse, K., Parent, M. et Campeau, S. (2013) Caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Département des sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières, 134 p., 15 annexes et 30 documents cartographiques (1:100 000).

Lemoalle J. and De Condappa D. (2009) Water atlas of the Volta Basin-Atlas de l'eau dans le bassin de la Volta. Challenge Program on Water and Food and Institut de Recherche pour le Développement, Colombo, Marseille, 96 p.

Leonello, C. (2015) jqPlot. Consulté sur ligne: <http://www.jqplot.com/>

Mathiyalagan, V., Grunwald, S., Reddy, K.R. and Bloom, S.A (2005) A WebGIS and geodatabase for Florida's wetlands, Computers and Electronics in Agriculture, vol. 47, n°1, p.69-75.

MAMROT. (2013) Ministère des Affaires municipales, Régions occupation du territoire. Répertoire des municipalités. <http://www.mamrot.gouv.qc.ca>

MapServer PSC. (2015) The MapServer Project Steering Committee, MapServer. Consulté en ligne : <http://mapserver.org/>

MDDELCC. (2013) Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Programmes d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines. Consulté en ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/inter.htm>

NRCan. (2015) Natural Resources Canada, GeoGratis Web Services. Consulté en ligne : <https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography/topographic-information/free-data-geogratis/geogratis-web-services/17216>

OGC. (2015) The Open Geospatial Consortium. Consulté en ligne : <http://www.opengeospatial.org/>

Oracle Corporation. (2015) MySQL. Consulté en ligne : <http://www.mysql.com/>

Panagos, P., Liedekerke, M.V., Montanarella, L. and Jones, R.J.A (2008) Software, Data and Modelling News: Soil organic carbon content indicators and web mapping applications. *Environnement Modelling & Software*, vol. 23, no9, p.1207-1209.

Peterson, M.P. (2008) *International perspectives on Maps and the Internet*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Germany, p. 91-101 & 243-279.

Pornon, H., Yalamas, P. and Pelegris, E. (2008) Services web géographiques, état de l'art et perspectives. *Géomatique Expert*, vol. 65, p. 44-50.

PostgreSQL Global Development Group. (2015) PostgreSQL. Consulté en ligne : <http://www.postgresql.org/>

Rautenbach, V., Coetzee, S. and Iwaniak, A. (2012) Orchestrating OGC web services to produce thematic maps in a spatial information infrastructure. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 37, p. 107-120.

Rhind, D. (1989) Why GIS? *ARC News*, Vol. 11, N°3, ESRI, Inc., Redlands, CA

Schneuwly, D et Caloz, R (2013) *Modélisation conceptuelle des données*. Geographic Information Technology Training Alliance.

SIGEA. (2015) *Systèmes d'Information Géographique pour l'Enseignement Agricole. Serveur distants (WMS)*. Consulté en ligne: <http://sigea.educagri.fr/donnees/serveurs-distants-wms.html>

Steiniger, S. et Hunter, A.J.S. (2013) The 2012 free and open source GIS software map – A guide to facilitate research, development, and adoption. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 39, p. 136-150.

Talbot Poulin, M.C., Comeau, G., Tremblay, Y., Therrien, R., Nadeau, M.M., Lemieux, J.M., Molson, J., Fortier, R., Therrien, P., Lamarche, L., Donati-Daoust, F., Bérubé, S. (2013). *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2013, 172 pages, 19 annexes, 28 cartes.

Vladimir, A. (2015) Leaflet. Consulté sur ligne : <http://leafletjs.com/>

2-clause BSD License (2015) OpenLayers. Consulté sur ligne : <http://openlayers.org/>

8. Annexes

8.1. Annexe 1 : Description des livrables de la phase III du projet PACES-NSF

Tableau 4 - Description des livrables de la phase III du projet PACES-NSF

Activité	Livrable
1. Description région	Cartes thématiques, document technique et document de vulgarisation
2. Contexte géologique	Cartes thématiques, document technique et document de vulgarisation
3. Contexte hydrogéologique	Cartes thématiques, document technique et document de vulgarisation; modèle conceptuel, propriétés hydrauliques, conditions d'écoulement
4. Estimation de la recharge	Chroniques de recharges estimées au moyen de différentes méthodes : séparation des débits de base, hydrogrammes de puits, identification des zones de recharge, modèle HELP calé sur les débits de base.
5. Modélisation hydrogéologique	Modèle Mike SHE calé simulant les écoulements souterrains sur la zone d'étude; balises pour les principales étapes de la modélisation (e.g. outil commercial utilisé, paramétrisation, calage).
6. Bilan hydrologique	Cartes thématiques, document technique et document de vulgarisation
7. Qualité de l'eau	Cartes thématiques, document technique et document de vulgarisation
8. Vulnérabilité	Cartes thématiques (carte de vulnérabilité DRASTIC), document technique et document de vulgarisation
9. Pérennité de la ressource	Cartes thématiques, document technique et document de vulgarisation
10. Recommandations	Document technique et document de vulgarisation
11. Rapport final	Base de données mise à jour, documents thématiques et couches numériques.

8.2. Annexe 2 : Données expérimentales

Tableau 5 - Description des données expérimentales

	Thèmes	Sources	Résolution/ Échelle
1	Route, limites municipales et toponymie	BDTQ, MAMROT, SDA	1 : 20 000
2	Topographie	BDTQ	1 : 20 000
3	Modèle numérique altimétrique	MERN	1 : 20 000/ 10 m x 10 m
4	Pente du sol	UQAM	1 : 20 000/ 10 m x 10 m
5	Hydrographie	BDTQ	1 : 20 000
6	Limites de bassins et de sous-bassins	CEHQ	1 : 20 000
7	Couverture végétale – peuplements forestiers	SIEF	1 : 20 000/ 10 m x 10 m
8	Couverture végétale – agriculture	BDCG, Financière agricole, UQAM	1 : 20 000
9	Milieus humides	CIC, 2012	1 : 20 000
10	Pédologie	DPEP, IRDA	1 : 20 000
11	Réseau de suivi météorologique, hydrologique et piézométrique	MDDELCC, DSEE, CEHQ, UQAM	N/A
12	Occupation du sol	LANDSAT DPEP	25 m x 25 m
13	Affectation du territoire	MAMROT	1 : 20 000
14	Travaux de terrain	UQAM	1 : 20 000
15	Géologie du roc	SIGEOM	1 : 250 000
16	Géologie du Quaternaire	Lamothe et St-Jacques, 2014	1 : 20 000
17	Épaisseur des dépôts meubles	SIH, MTQ, MERN-SIGPEG, consultants, UQAM, SIGEOM	1 : 20 000/ 250 m x 250 m
18	Topographie du roc	UQAM	250 m x 250 m
19	Indice de confinement	UQAM	250 m x 250 m

	Thèmes	Sources	Résolution/ Échelle
20	Contextes hydrogéologiques	UQAM	500 m x 500 m
21	Piézométrie dans le roc	UQAM	250 m x 250 m
22	Zones préférentielles de recharge et de résurgences	UQAM	500 m x 500 m 1 : 20 000
23	Indice DRASTIC de l'aquifère au roc	UQAM	250 m x 250 m
24	Types d'eau pour l'aquifère au roc	UQAM	N/A
25	Activité du ²²² Rn dans les eaux souterraines et les eaux de surface	UQAM	N/A
26	Approvisionnement municipaux	MDDELCC	1 : 20 000
27	Consommation d'eau par type de source	MDDELCC, Statistiques Canada, MAPAQ	N/A
28	Consommation d'eau par type d'utilisation	MDDELCC, Statistiques Canada, MAPAQ	N/A
29	Qualité de l'eau souterraine – Critères de potabilité (Éléments inorganiques)	UQAM	1 : 20 000
30	Qualité de l'eau souterraine – Critères de potabilité (Nitrates)	UQAM	1 : 20 000
31	Qualité de l'eau souterraine – Critères de potabilité (Bactériologie)	UQAM	1 : 20 000
32	Qualité de l'eau souterraine – Critères esthétiques	UQAM	1 : 20 000
33	Qualité de l'eau souterraine – Pesticides et produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP)	UQAM	1 : 20 000
34	Densité des activités anthropiques	UQAM	250 m x 250 m
35	Densité des activités agricoles	UQAM	250 m x 250 m

8.3. Annexe 3 : Résumé de l'utilisation de l'eau souterraine

Tableau 6 - Résumé de l'utilisation de l'eau souterraine (Larocque et al., 2015a, p.189)

MRC	Municipalité	Utilisation de l'eau [m ³ /année]	
		Totale	Eau souterraine
Acton		2881	2881
	Saint-Nazaire-d'Acton	2816	2816
	Saint-Théodore-d'Acton	65	65
Arthabaska		21 576 823	11 608 823
	Chesterville	227 324	227 324
	Ham-Nord	122 900	122 900
	Kingsey Falls	2 733 950	340 017
	Notre-Dame-de-Ham	60 544	60 544
	Saint-Albert	343 798	343 798
	Saint-Christophe-d'Arthabaska	3 704 715	3 703 302
	Sainte-Anne-du-Sault	533	533
	Sainte-Clotilde-de-Horton	818 630	326 960
	Sainte-Élizabeth-de-Warwick	145 416	145 416
	Sainte-Hélène-de-Chester	84 779	84 779
	Sainte-Séraphine	1 480 515	144 150
	Saint-Norbert-d'Arthabaska	314 119	314 119
	Saint-Rémi-de-Tingwick	127 248	127 248
	Saint-Rosaire	308 716	31 098
	Saint-Samuel	169 728	169 728
	Saints-Martyrs-Canadiens	13 615	13 615
	Saint-Valère	419 131	220 000
	Tingwick	458 289	300 905
Bécancour		19 936	19 936
	Bécancour	19 936	19 936
Drummond		36 400 682	5 965 958
	Drummondville	14 295 449	612 760
	Durham-Sud	122 055	122 055
	L'Avenir	251 192	251 192
	Lefebvre	78 700	78 700
	Notre-Dame-du-Bon-Conseil	13 059 414	1 129 453
	Saint-Bonaventure	169 580	169 580
	Saint-Cyrille-de-Wendover	2 120 889	902 350
	Sainte-Brigitte-des-Saults	553 233	553 233
	Saint-Félix-de-Kingsey	284 410	284 410
	Saint-Germain-de-Grantham	603 992	603 992
	Saint-Lucien	3 775 409	200 744
	Saint-Majorique-de-Grantham	135 105	116 977
	Saint-Pie-de-Guire	383 180	372 439
	Wickham	568 074	568 074
Le Haut-Saint-François		71 852	68 036
	Dudswell	41 001	41 001
	Weedon	30 852	27 035
Le Val-Saint-		133 955	133 955

MRC	Municipalité	Utilisation de l'eau [m ³ /année]	
		Totale	Eau souterraine
François			
	Cleveland	64 926	64 926
	Melbourne	83	83
	Saint-Claude	7 531	7 531
	Stoke	152	152
	Ulverton	61 262	61 262
L'Érable		4 234 537	1 429 278
	Plessisville	52 626	52 626
	Princeville	*	1 276 696
	Sainte-Sophie-d'Halifax	26 519	26 519
	Saint-Ferdinand	73 436	73 436
Les Appalaches		577 992	577 992
	Saint-Fortunat	570 089	570 089
	Saint-Jacques-le-Majeur-de-Wolfestown	689	689
	Saint-Julien	7 214	7 214
Les Sources		2 425 827	977 594
	Asbestos	1 248 512	55 492
	Danville	539 300	284 087
	Ham-Sud	21 425	21 425
	Saint-Adrien	74 620	74 620
	Saint-Camille	98 989	98 989
	Saint-Georges-de-Windsor	136 247	136 247
	Wotton	306 734	306 734
Nicolet-Yamaska		5 580 468	2 527 104
	Baie-du-Febvre	356 303	147 699
	Grand-Saint-Esprit	56 895	56 895
	La Visitation-de-Yamaska	200 304	159 490
	Nicolet	1 408 602	161 514
	Odanak	48 410	48 410
	Pierreville	958 071	199 309
	Saint-Célestin	13	13
	Sainte-Eulalie	411 610	69 803
	Saint-Elphège	93 514	87 770
	Sainte-Monique	196 194	121 974
	Sainte-Perpétue	361 832	280 204
	Saint-François-du-Lac	749 309	517 043
	Saint-Léonard-d'Aston	452 320	452 320
	Saint-Wenceslas	17 262	17 262
	Saint-Zéphirin-de-Courval	269 827	207 397
Pierre-de-Saurel		45 344	45 344
	Saint-David	4 735	4 735
	Saint-Gérard-Majella	9 110	9 110
	Yamaska	31 498	31 498
TOTAL		71 070 295	23 356 900

* Données non publiques

8.4. Annexe 4 : La liste des entités

Tableau 7 - La liste des entités

ID	Entités	Sous-classes	Questions	Type de données	Géométrie
1.1.1.1	Courbes de niveau	1.1.1	Q1	Vectorielle	Ligne
1.1.2.1	Réseau routier	1.1.2	Q2	Vectorielle	Ligne
1.1.2.2	MRC	1.1.2	Q2	Vectorielle	Polygone
1.1.2.3	Toponymie de MRC	1.1.2	Q2	Vectorielle	Point
1.1.2.4	Municipalités	1.1.2	Q2	Vectorielle	Polygone
1.1.2.5	Toponymie de municipalité	1.1.2	Q2	Vectorielle	Point
1.1.3.1	Élévation	1.1.3	Q3	Matricielle	
1.1.4.1	Pente du sol	1.1.4	Q4, Q5	Matricielle	
1.1.5.1	Hydrographie linéaire	1.1.5	Q6	Vectorielle	Ligne
1.1.6.1	Bassin versant de niveau 1	1.1.6	Q7	Vectorielle	Polygone
1.1.6.2	Bassin versant de niveau 2	1.1.6	Q7	Vectorielle	Polygone
1.1.7.1	Peuplements forestiers	1.1.7	Q8, Q9, Q10	Matricielle	
1.1.7.2	Agriculture	1.1.7	Q11, Q12, Q13	Vectorielle	Polygone
1.1.8.1	Milieux humides	1.1.8	Q14, Q15, Q16	Vectorielle	Polygone
1.1.9.1	Pédologie	1.1.9	Q17	Matricielle	
1.1.10.1	Occupation du sol	1.1.10	Q18, Q19, Q20	Matricielle	
1.1.11.1	Affectation du territoire	1.1.11	Q21, Q22, Q23	Matricielle	
1.2.1.1	Géologie du roc	1.2.1	Q24, Q25	Matricielle	
1.2.1.2	Linéaments	1.2.1	Q24, Q25	Vectorielle	Ligne
1.2.2.1	Dépôts quaternaires	1.2.2	Q26	Matricielle	
1.2.2.2	Épaisseur des dépôts	1.2.2	Q27	Matricielle	

ID	Entités	Sous-classes	Questions	Type de données	Géométrie
	meubles				
1.2.2.3	Topologie du roc	1.2.2	Q28	Matricielle	
1.2.3.1	Indice de confinement	1.2.3	Q29, Q30	Matricielle	
1.2.4.1	Contextes hydrogéologiques	1.2.4	Q31	Matricielle	
1.3.1.1	Points utilisés pour l'interpolation	1.3.1	Q32	Vectorielle	Point
1.3.1.2	Isopiètes (intervalle 50 m)	1.3.1	Q33	Vectorielle	Ligne
1.3.1.3	Élévation piézométrique	1.3.1	Q32	Matricielle	
1.3.2.1	Résurgence	1.3.2	Q34	Vectorielle	Ligne
1.3.2.2	Zone de recharge présente	1.3.2	Q35	Vectorielle	Polygone
1.3.2.3	Recharge spatialisée	1.3.2	Q36	Matricielle	
1.3.3.1	Indice DRASTIC	1.3.3	Q37	Matricielle	
1.3.4.1	Type d'eau souterraine	1.3.4	Q38	Vectorielle	Point
1.4.1.1	Pondération du risque (anthropique)	1.4.1	Q39	Matricielle	
1.4.2.1	Pondération du risque (agricole)	1.4.2	Q40	Matricielle	
2.1.1.1	Geozone (zone d'étude, MRC, municipalité)	2.1.1	Q41, Q42	Vectorielle	Polygone
2.2.1.1	Catégorie (normes de potabilité)	2.2.1	Q43, Q44	Non-spatiale	
2.2.1.1.1	Indicateur (baryum, fluor, arsenic, plomb, etc.)	2.2.1.1	Q43, Q44	Non-spatiale	

8.5. Annexe 5 : Dépassement de normes de potabilité - Éléments inorganiques

Tableau 8 - Sommaire des dépassements de normes de potabilité – Éléments inorganiques

Paramètres	Nombre de puits échantillonnés	Critères de potabilité (mg/L)	Nombre de dépassements	
			dans l'aquifère granulaire	dans l'aquifère au roc
Arsenic	201	0,01	1	12
Baryum	201	5	4	12
Fluor	201	1,5	0	2
Nitrites/Nitrates	201	10	1	0
Plomb	201	0,01	1	1
Uranium	201	0,02	0	1

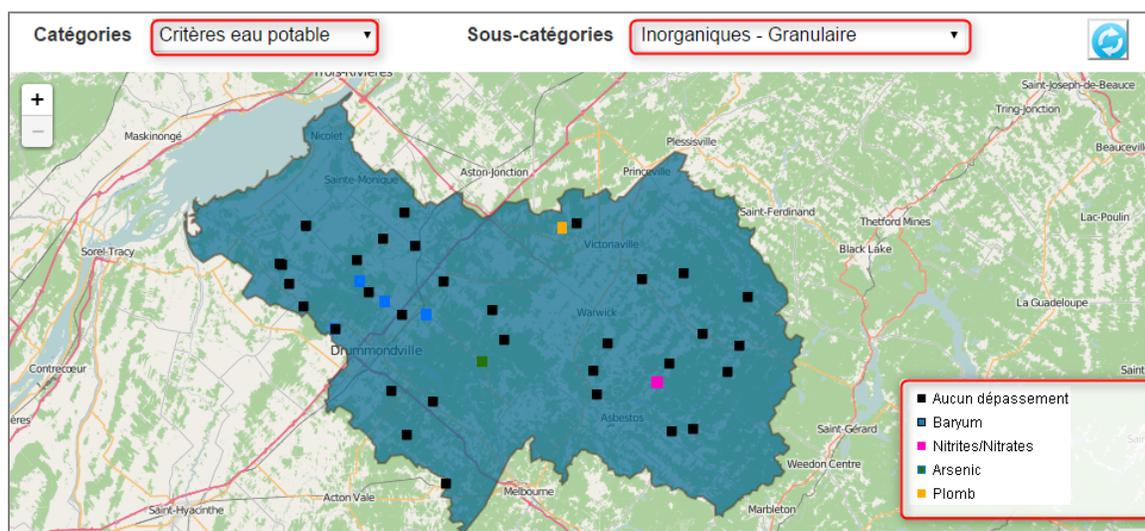


Figure 22 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère granulaire - Éléments inorganiques

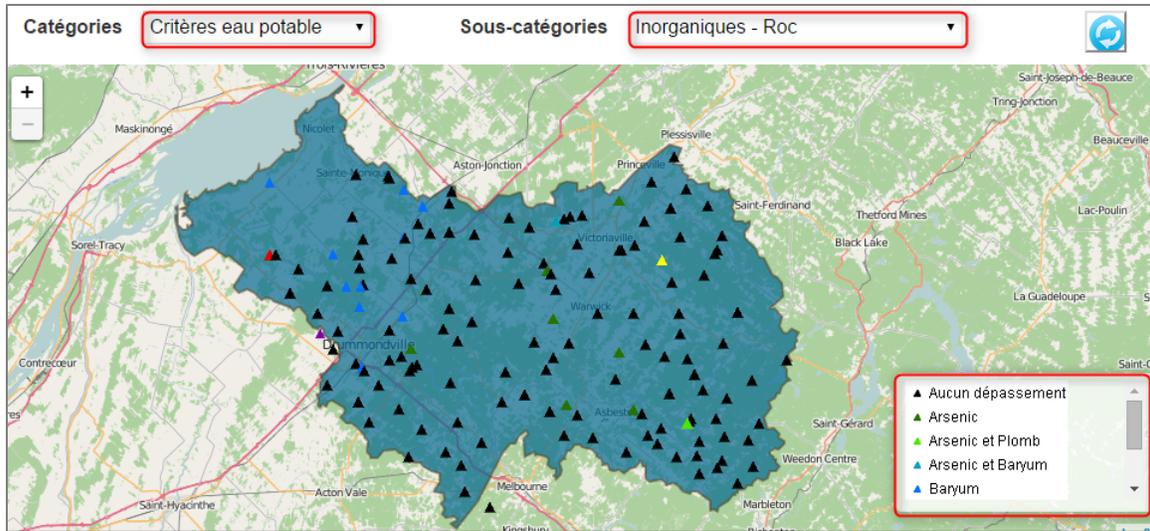


Figure 23 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère au roc - Éléments inorganiques

8.6. Annexe 6 : Dépassement de normes de potabilité – Détection de nitrates

1) Dans l'aquifère granulaire

Tableau 9 - Sommaire des dépassements de normes de potabilité dans l'aquifère granulaire - Détection de nitrates

Nombre de puits échantillonnés	Nombre de dépassements	Détection de nitrates (mg N-NO ₃ /L)				
		Non détecté	≥ 10	≥3 - <10	≥1 - <3	<1
201		23	1	2	8	11

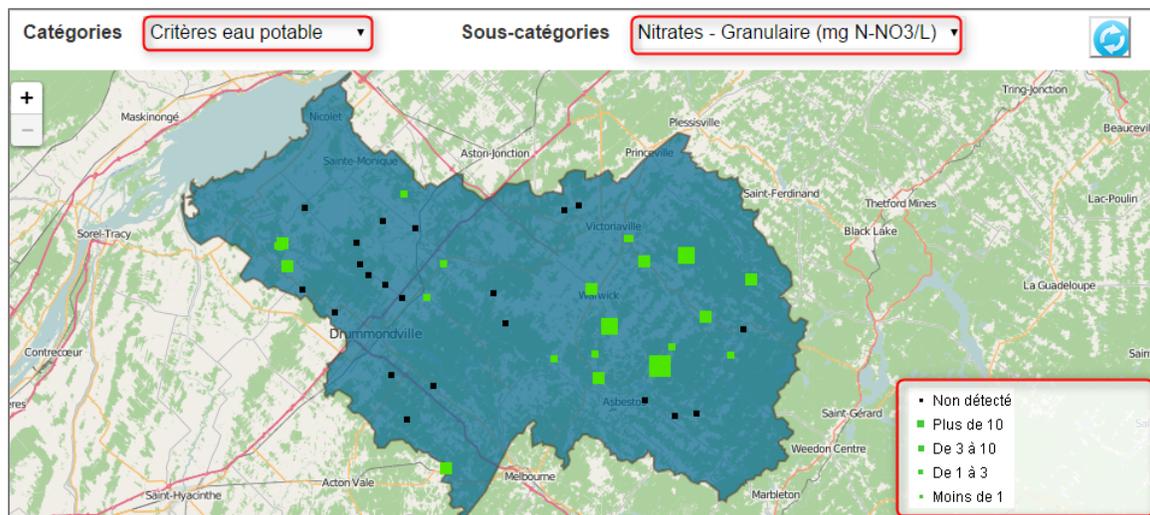


Figure 24 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère granulaire - Détection de nitrates

2) Dans l'aquifère au roc

Tableau 10 - Sommaire des dépassements de normes de potabilité dans l'aquifère au roc - Détection de nitrates

Nombre de puits échantillonnés	Nombre de dépassements	Détection de nitrates (mg N-NO ₃ /L)			
		Non détecté	≥3 - <10	≥1 - <3	<1
201		109	8	8	31

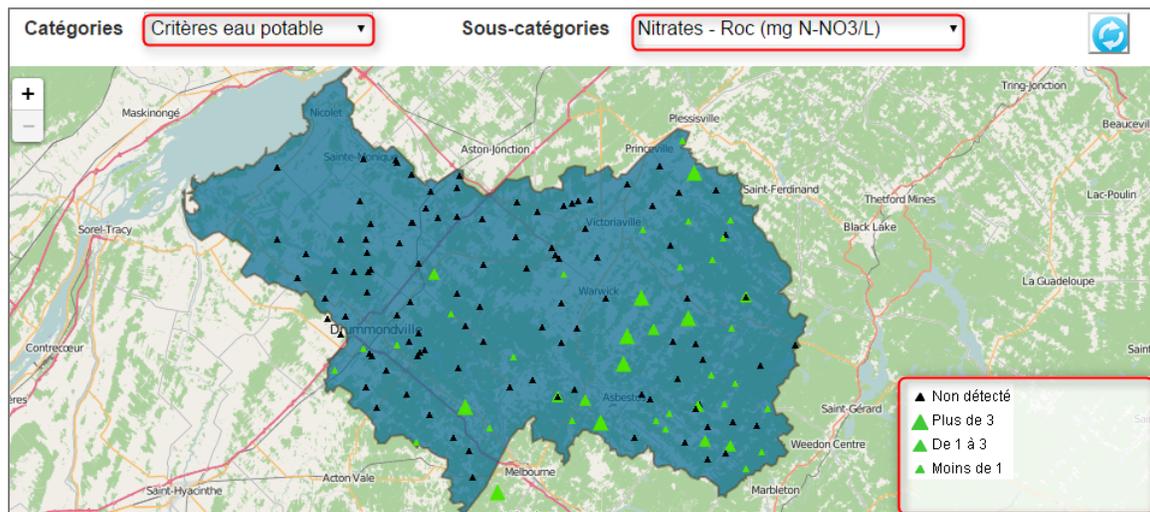


Figure 25 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère au roc - Détection de nitrates

8.7. Annexe 7 : Dépassements de normes de potabilité – Bactériologie

1) Aquifère granulaire

Tableau 11 - Sommaire des dépassements de normes de potabilité dans l'aquifère granulaire - Bactériologie

Nombre de puits échantillonnés	Nombre de dépassements		
	Non détecté	Non conforme	Non potable
201	25	8	8

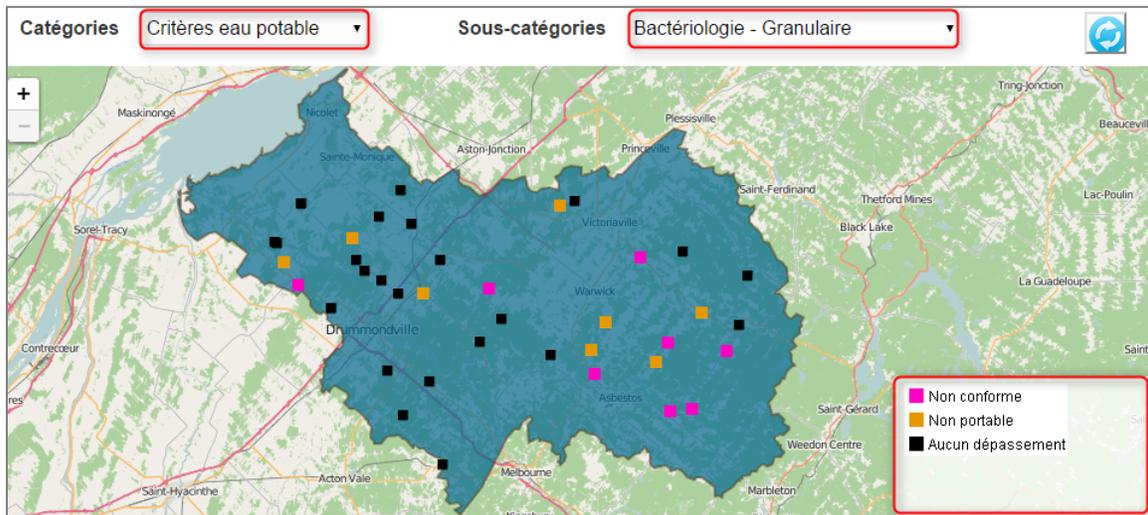


Figure 26 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère granulaire - Bactériologie

2) Aquifère au roc

Tableau 12 - Sommaire des dépassements de normes de potabilité dans l'aquifère au roc - Bactériologie

Nombre de puits échantillonnés	Nombre de dépassements		
	Non détecté	Non conforme	Non potable
201	99	29	32

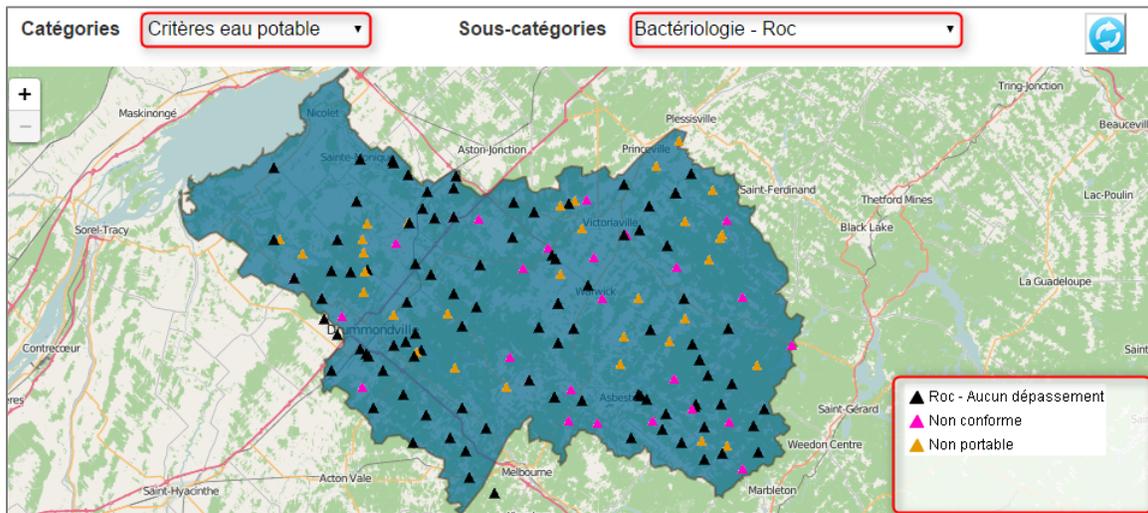


Figure 27 - Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable dans l'aquifère au roc - Bactériologie

8.8. Annexe 8 : Dépassements esthétiques

Tableau 13 - Sommaire des dépassements esthétiques

Paramètres	Nombre de puits échantillonnés	Objectifs esthétiques (mg/L)	Nombre de dépassements	
			dans l'aquifère granulaire	dans l'aquifère au roc
Aluminium	201	0,1	3	4
Chlore	201	250	0	6
Dureté totale (mg CaCO ₃ /l)	193	1	10	43
Fer	201	200	13	35
Matière dissoute totale	193	0,3	7	39
Manganèse	201	500	14	78
Sodium	201	0,05	2	12
pH	201	200	11	29
Sulfate	201	6,5-8,5	0	1
Sulfure	201	500	2	5
Température	201	15	3	3

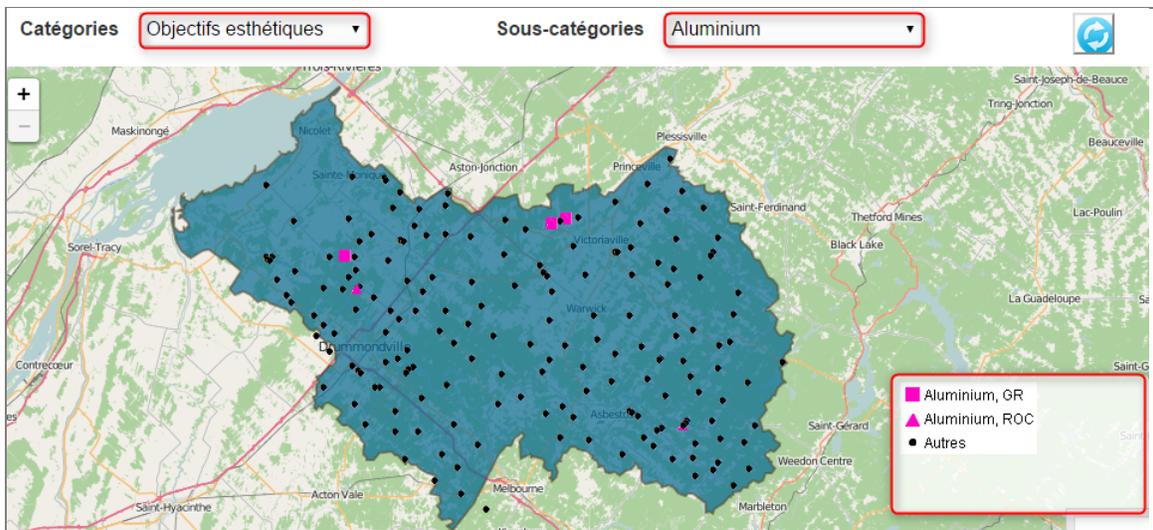


Figure 28 - Dépassements esthétiques - Aluminium

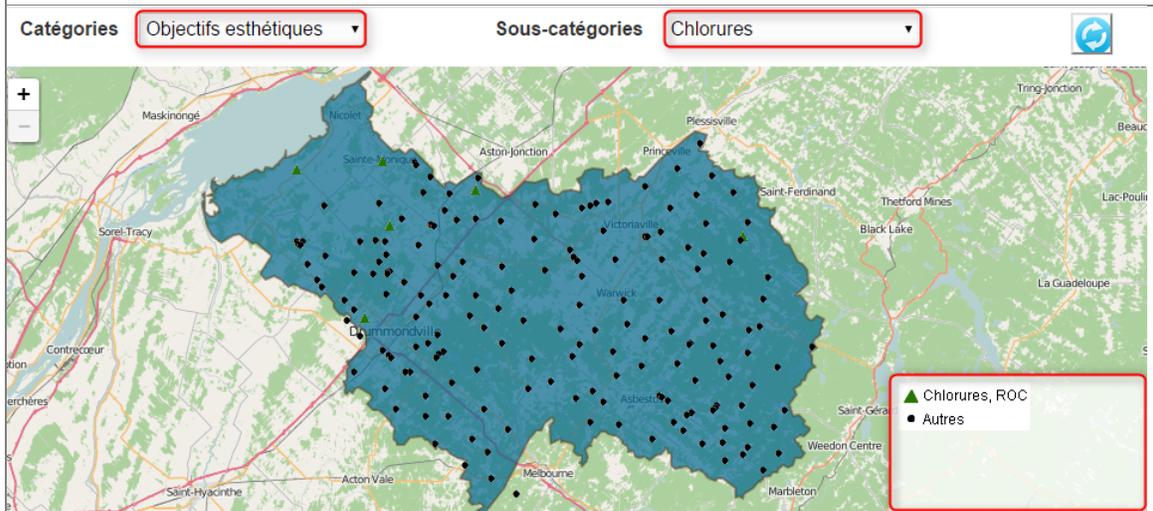


Figure 29 - Dépassements esthétiques - Chlorures

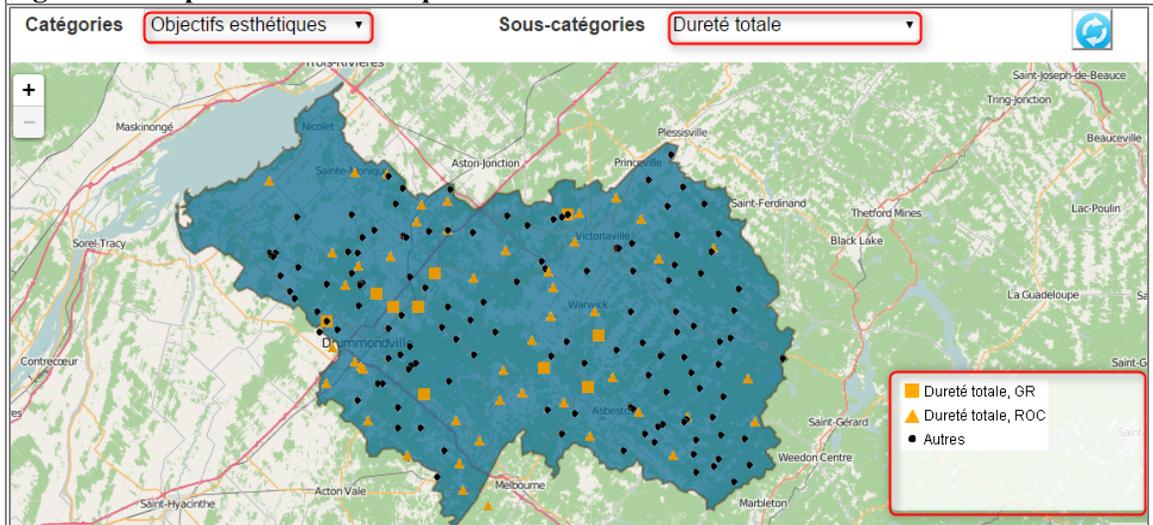


Figure 30 - Dépassements esthétiques - Dureté totale

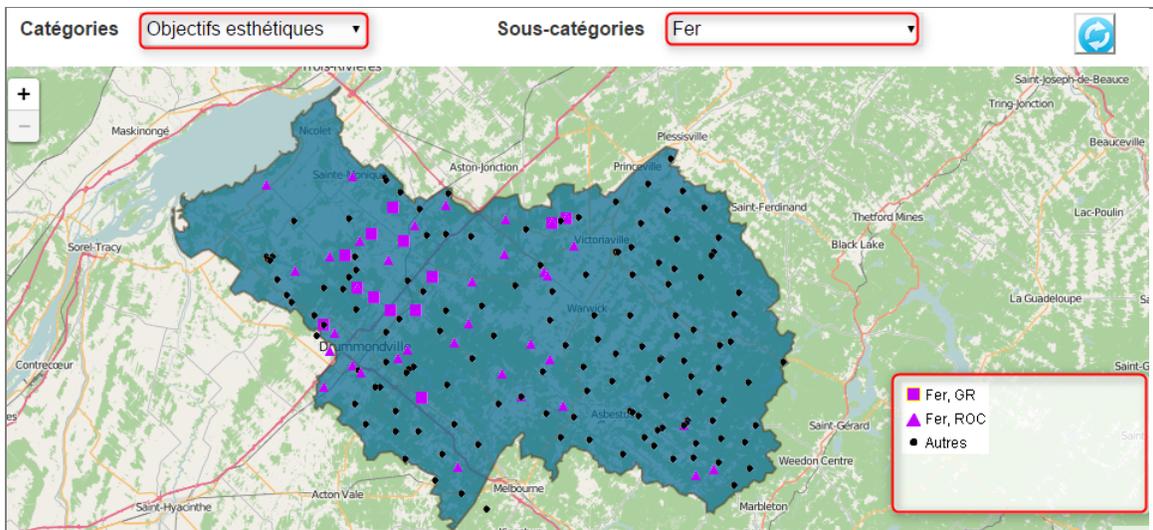


Figure 31 - Dépassements esthétiques - Fer

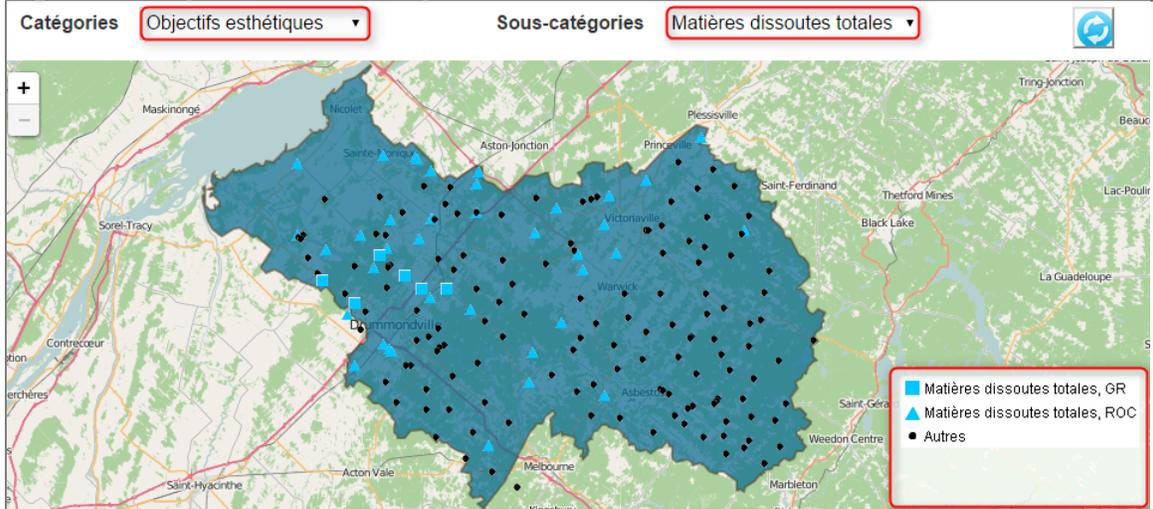


Figure 32 - Dépassements esthétiques - Matières dissoutes totales

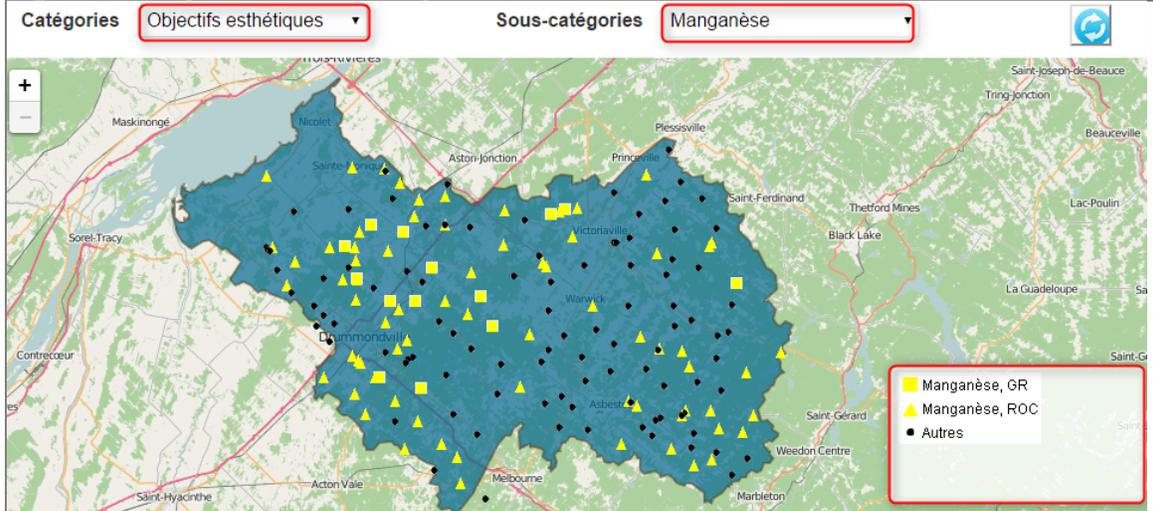


Figure 33 - Dépassements esthétiques - Manganèse

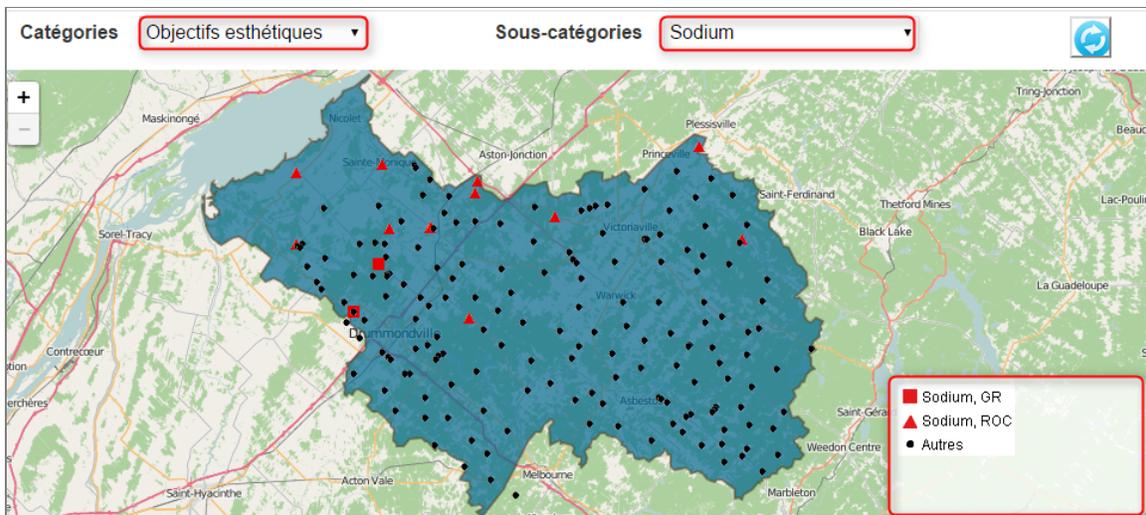


Figure 34 - Dépassements esthétiques - Sodium

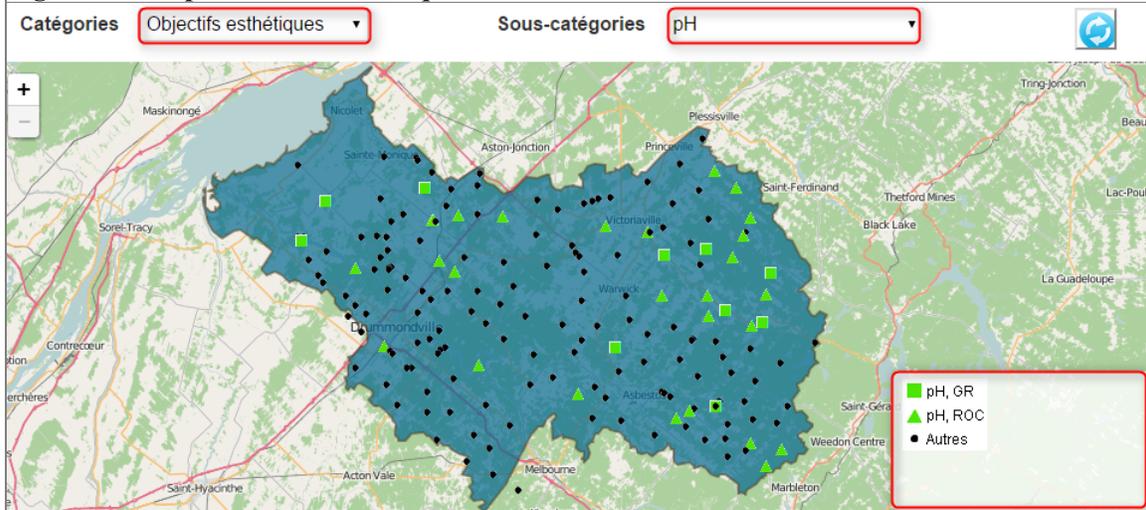


Figure 35 - Dépassements esthétiques - pH

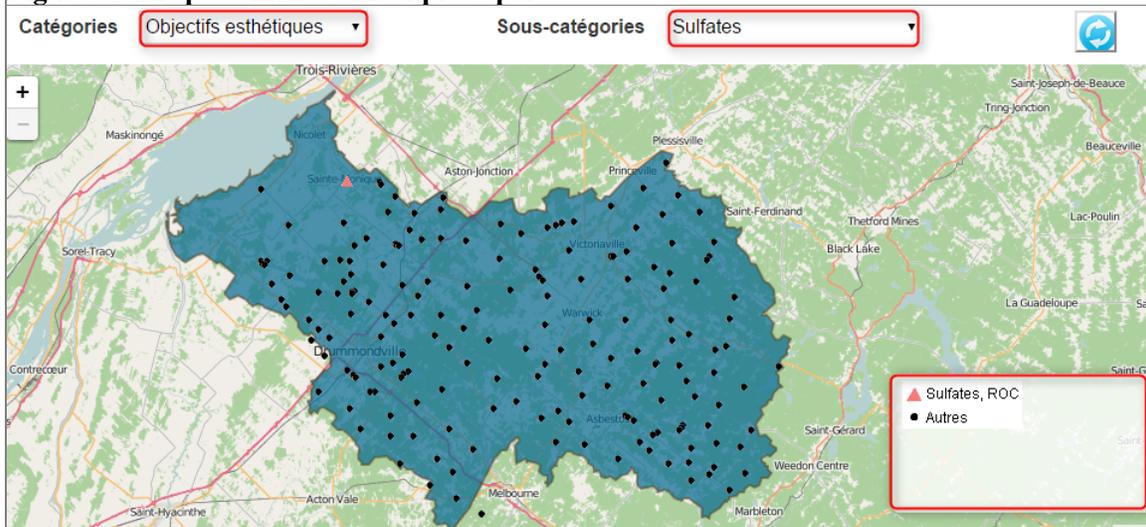
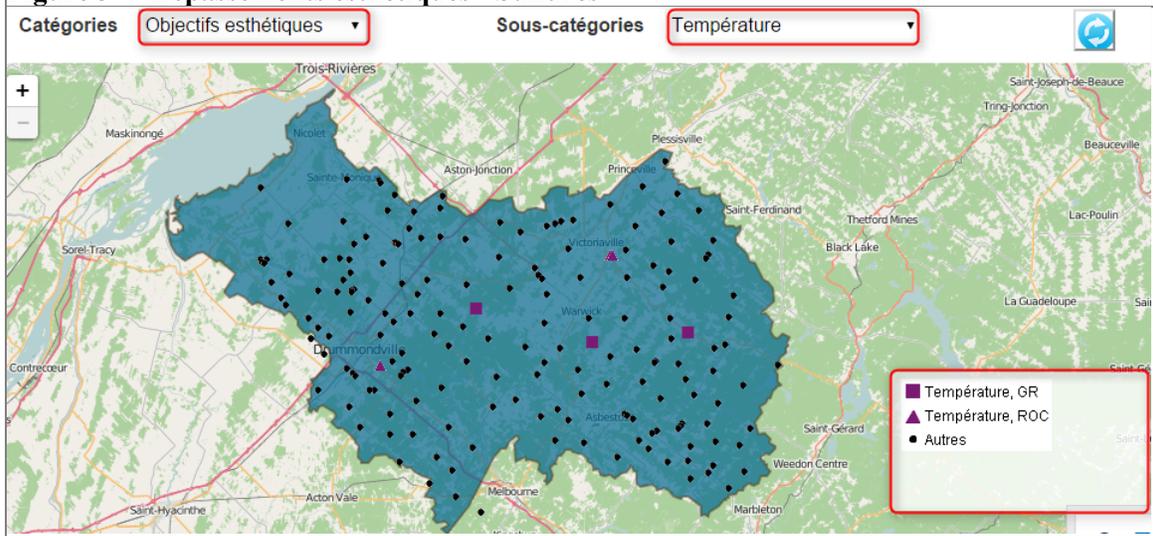
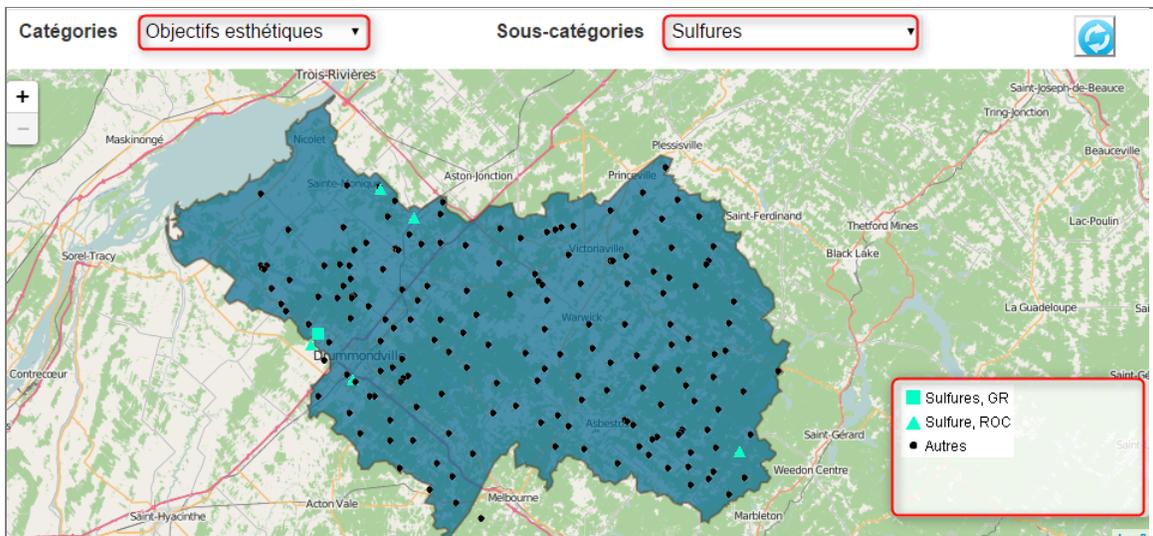


Figure 36 - Dépassements esthétiques - Sulfates



8.9. Annexe 9 : Détection d'au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2013

Tableau 14 - Détection d'au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2013

	Nombre de puits échantillonnés	Aucune détection	Détection - Granulaire	Détection - Roc
Pesticides	147	134	3	10
PPSP	67	41	7	19

1) Détection de pesticides en 2013

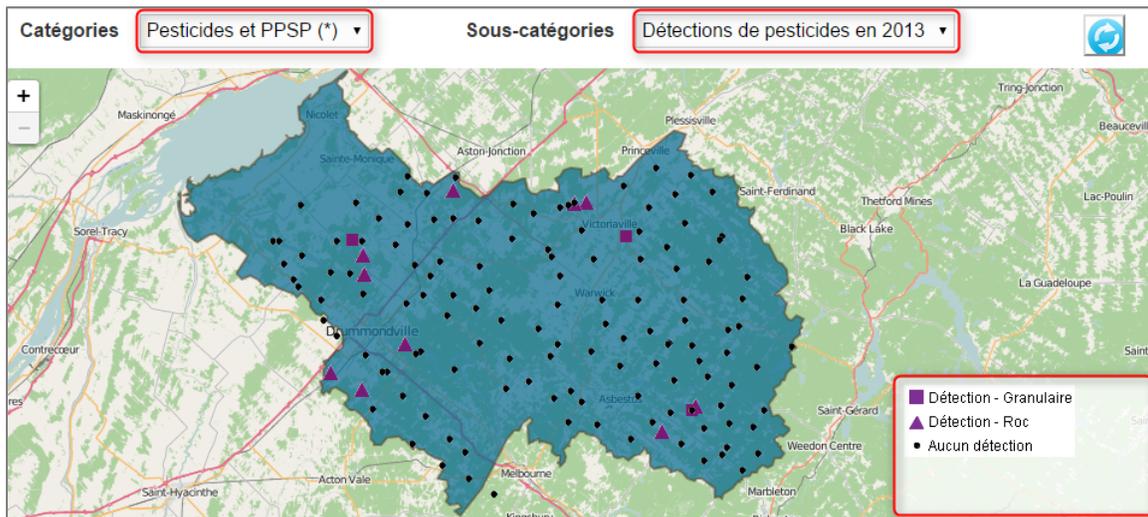


Figure 39 - Détection de pesticides en 2013

2) Détection de PPSP en 2013

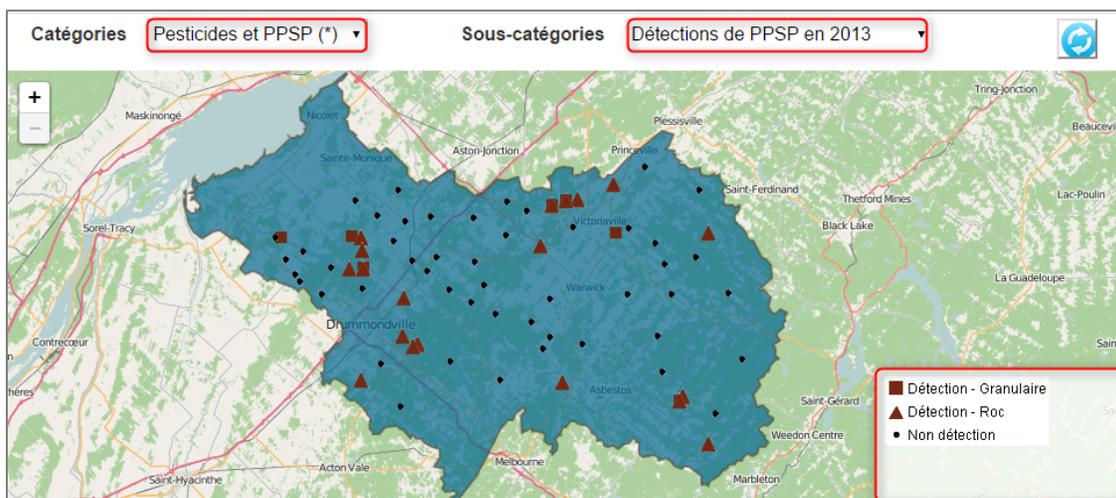


Figure 40 - Détection de PPSP en 2013

8.10. Annexe 10 : Détection d'au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2014

Tableau 15 - Détection d'au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2014

	Nombre de puits échantillonnés	Aucune détection	Détection - Granulaire	Détection - Roc
Pesticides	33	7	8	18
PPSP	33	4	8	21

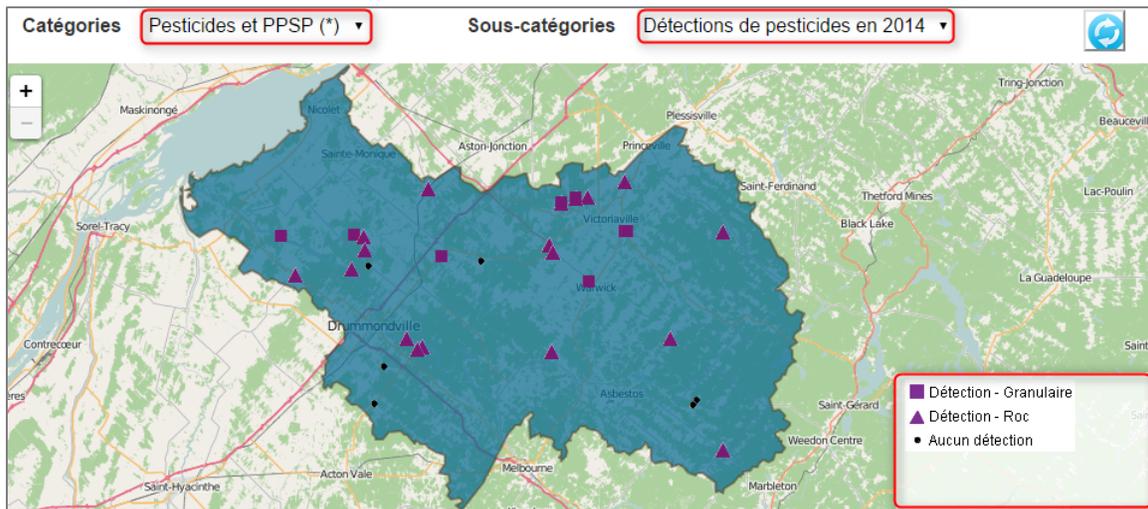


Figure 41 - Détection de pesticides en 2014

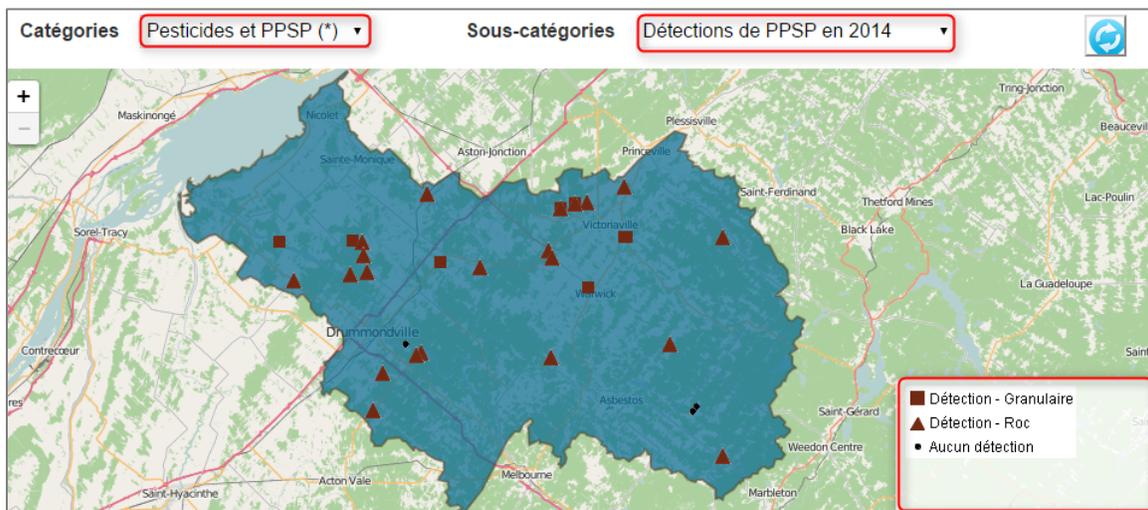


Figure 42 - Détection de PPSP en 2014

8.11. Annexe 11 : Représentation du « module d’atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau de zone d’étude

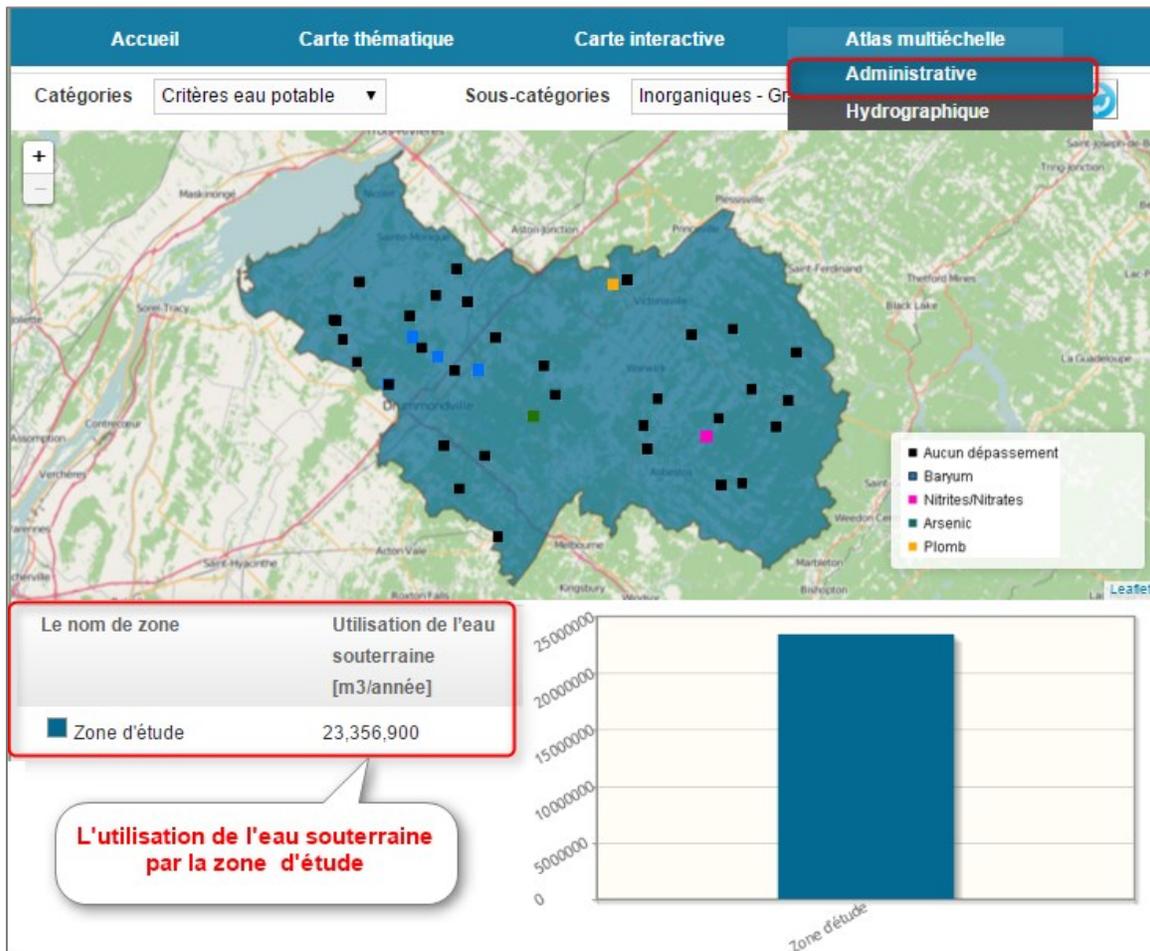


Figure 43 - Représentation du « module d’atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau de zone d’étude

8.12. Annexe 12 : Représentation du « module d’atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau de municipalité

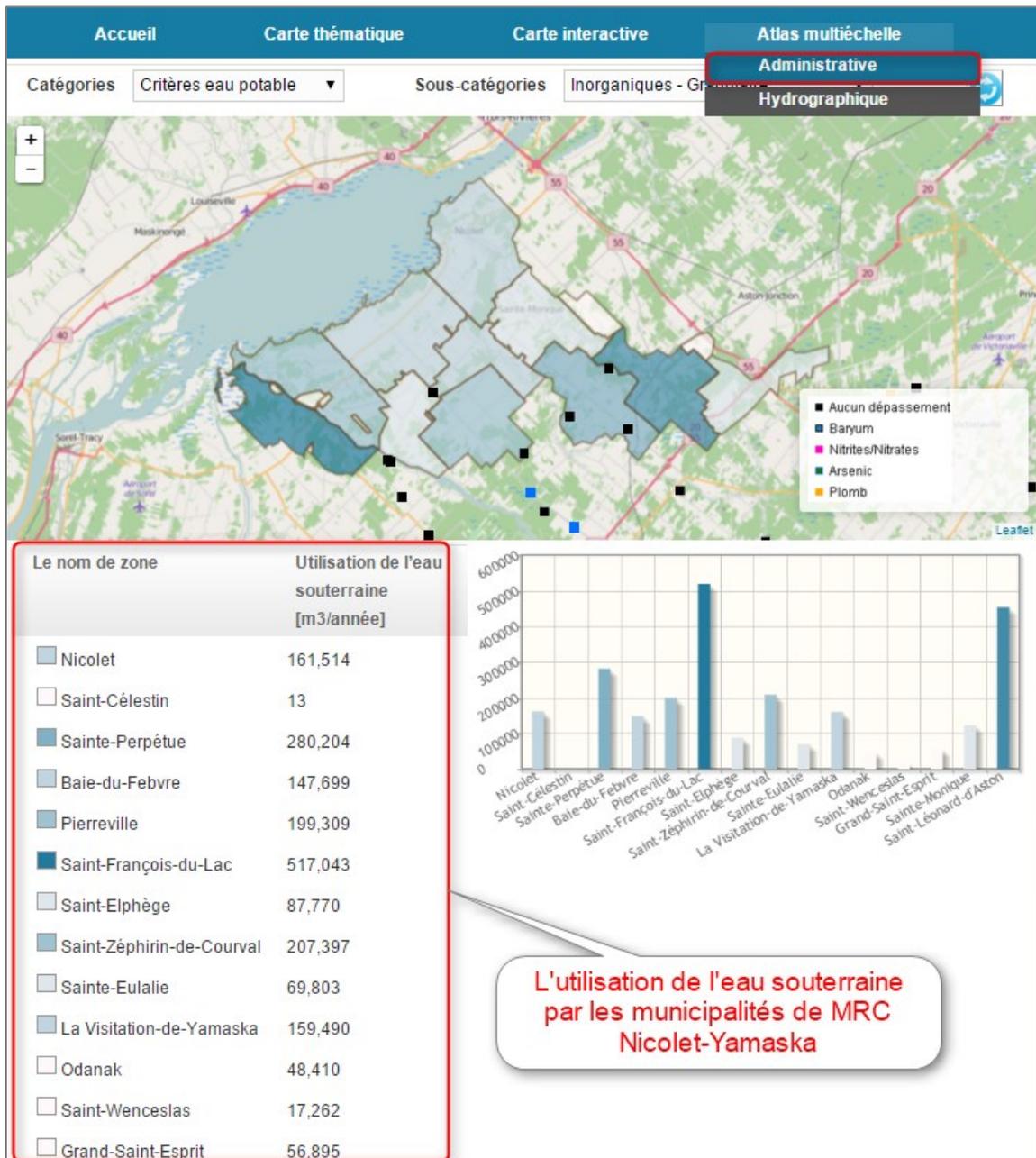


Figure 44 - Représentation du « module d’atlas multiéchelle » pour la carte administrative au niveau de municipalité