

**Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux  
souterraines en Chaudière-Appalaches**

**Rapport d'étape de la phase II  
(version finale)**

Déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et  
des Parcs du Québec, dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur  
les eaux souterraines

Par l'Institut national de la recherche scientifique, Centre - Eau Terre Environnement  
(INRS-ETE), en collaboration avec la Commission géologique du Canada (CGC),  
l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et le  
Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-  
CA)

Rapport de recherche R-1509

Mars 2014

ISBN : 978-2-89146-849-7

©INRS, 2014

## **Équipe de réalisation**

### **INRS-ETE**

Jean-Marc-Ballard  
Marc-André Carrier  
René Lefebvre  
Harold Vigneault  
Xavier Malet  
Annie Therrien  
Laureline Berthot  
Guillaume Légaré-Couture

### **IRDA**

Isabelle Beaudin  
Aubert Michaud  
Ariane Drouin

### **OBV-CA**

Marie-Hélène Cloutier

### **CGC**

Michel Parent  
Christine Rivard

Pour fins de référence, ce document devrait être cité comme suit:

Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Vigneault, H., Malet, X., Therrien, A., Berthot, L., Légaré-Couture, G., Beaudin, I., Michaud, A., Drouin, A., Cloutier, M.-H., Parent, M. (2013). Rapport d'étape de la phase II (version finale), Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, l'IRDA et les OBV-CA, dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines. Rapport final INRS (R-1509), soumis en mars 2014.

Pour nous joindre :



Institut national de la recherche scientifique  
Centre - Eau Terre Environnement

490, rue de la Couronne  
Québec (Québec) G1K 9A9 CANADA  
T 418 654-2524 F 418 654-2600  
[www.ete.inrs.ca](http://www.ete.inrs.ca)

## **RÉSUMÉ**

Ce projet s'inscrit dans le cadre du « Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec » (PACES) qui est sous la responsabilité du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) du Québec. Le PACES vise à dresser un portrait de la ressource en eau souterraine du Québec municipalisé, dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité. La région d'étude de ce projet comprend les neuf municipalités régionales de comté (MRC) de la région de la Chaudière-Appalaches et inclut au moins en partie le territoire de neuf organismes de bassin versant (OBV). La superficie totale du secteur d'étude est d'environ 15 600 km<sup>2</sup> et la population totale des 135 municipalités couvertes se chiffre à plus de 275 000 personnes (MAMROT, 2013).

Ce deuxième rapport d'étape présente un sommaire de la méthodologie et des résultats de la seconde année du *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Chaudière-Appalaches*, qui comportait une importante campagne de travaux de terrain. Ces travaux comprenaient notamment de l'échantillonnage de sol et d'eau, des sondages et des forages dans les dépôts meubles et au roc, l'installation de puits de suivi, des essais de perméabilité et des levés géophysiques de sismique réflexion. Les travaux de collecte de données existantes et d'intégration dans la base de données se sont également poursuivis. La collecte de rapports provenant des municipalités est pratiquement complétée, de même que l'intégration des données hydrogéologiques utiles au projet. L'enquête sur l'utilisation de l'eau à l'aide d'un questionnaire est toujours en cours auprès des municipalités, alors qu'environ 61% d'entre elles ont répondu. L'interprétation des données de terrain nouvellement acquises a déjà débuté et elle se poursuivra durant la prochaine année qui permettra la finalisation du projet. Enfin, des travaux de terrain supplémentaires, notamment des sondages, seront effectués au début de l'été 2014 afin de préciser les contextes hydrogéologiques dans le secteur de Saint-Henri où il reste à confirmer la présence de paléochenaux des rivières Chaudières et Etchemin qui pourraient présenter un potentiel aquifère jusqu'ici inconnu.

## **REMERCIEMENTS**

Les auteurs tiennent à remercier le MDDEFP ainsi que tous les organismes partenaires du projet pour leurs contributions de même que leur collaboration au cours de la deuxième année du projet. Plus particulièrement, nous voulons souligner la contribution financière de la CRÉ de la Chaudière-Appalaches et les contributions en ressources humaines des organismes partenaires suivants :

- les municipalités régionales de comté (MRC) suivantes : Lotbinière, La Nouvelle-Beauce, Robert-Cliche, Beauce-Sartigan, Bellechasse, Les Etchemins, Montmagny et L'Islet;

Les auteurs veulent également remercier les organismes suivants de leur appui au projet :

- la Fédération de l'Union des producteurs agricoles (UPA) de la Chaudière-Appalaches;
- le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) - Direction régionale de la Chaudière-Appalaches.

La collaboration de plusieurs autres organismes, via le partage de données ou de connaissances, doit également être soulignée :

- le ministère des Transports du Québec (MTQ)
- le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN)
- le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) - Direction régionale de la Chaudière-Appalaches
- le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)
- la Commission régionale sur les ressources naturelles et le territoire (CRRNT) de la Chaudière-Appalaches
- l'Université Laval
- l'Université du Québec à Montréal (UQAM)
- le Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES)

Enfin, nous remercions les résidents de la Chaudière-Appalaches ainsi que les municipalités qui collaborent au projet en donnant accès à leur propriété ou à leur puits, afin de réaliser des travaux de terrain pour les saisons 2013-2014.

## **TABLE DES MATIÈRES**

<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>III</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>2 DESCRIPTION DU PROJET</b> .....	<b>1</b>
2.1 Objectif du projet.....	1
2.2 Territoire visé.....	2
2.3 Avancement du projet.....	3
<b>3 ACQUISITION ET TRAITEMENT DE DONNÉES EXISTANTES</b> .....	<b>4</b>
3.1 Utilisation d'eau souterraine.....	4
3.2 Cartographie de la géologie du Quaternaire.....	6
3.3 Géologie du roc.....	10
3.4 Données hydrométriques et pédologiques.....	11
3.5 Données extraites des documents collectés.....	12
<b>4 ACQUISITION DE DONNÉES DE TERRAIN</b> .....	<b>16</b>
4.1 Sondages au piézocône (CPT).....	16
4.2 Forages conventionnels.....	19
4.3 Installation de capteurs de pression.....	20
4.4 Essais de perméabilité.....	21
4.5 Échantillonnage de l'eau souterraine.....	22
4.6 Levés de sismique réflexion.....	26
4.7 Travaux de terrain complémentaires prévus en 2014.....	28
4.7.1 Sondages et forages.....	28
4.7.2 Levés électriques avec imagerie bidimensionnelle.....	28
4.7.3 Diagraphies.....	28
<b>5 INTÉGRATION DES DONNÉES COLLECTÉES</b> .....	<b>29</b>
5.1 Description de la base de données à référence spatiale.....	29
5.2 Bilan de l'intégration des données dans la base de données du projet.....	29
5.3 Validation des données collectées.....	31
<b>6 CONCLUSION</b> .....	<b>32</b>
<b>7 RÉFÉRENCES</b> .....	<b>33</b>

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Calendrier des travaux réalisés lors de la seconde phase du projet.....	3
Tableau 2 : Bilan des documents obtenus auprès des municipalités et partenaires du projet....	12
Tableau 3 : Bilan des données acquises et intégrées à la base de données .....	31

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Région d'étude et limites des OBV et des MRC .....	2
Figure 2 : Provenance de l'eau des réseaux par municipalité et localisation des captages .....	5
Figure 3 : Feuillet SNRC qui feront l'objet d'une révision de la géologie du Quaternaire dans l'année 2013-2014.....	7
Figure 4 : Compilation des affleurements rocheux dans la zone d'étude.....	8
Figure 5 : Exemple de révision de la cartographie de la géologie du Quaternaire à l'aide du LiDAR (comparaison du MNE (1) (MDDEFP) avec le LiDAR (2) et de l'interprétation régionale (Gaucher, 1984) (3) et avec la nouvelle interprétation basée sur le LiDAR (4).....	9
Figure 6 : Géologie du roc simplifiée .....	10
Figure 7 : Localisation des stations hydrométriques et durée des séries de débit.....	11
Figure 8 : Travaux de forages avec la foreuse Geotech 605D de l'INRS.....	17
Figure 9 : Emplacement des sondages CPT et RPSS.....	18
Figure 10 : Emplacement des forages conventionnels .....	20
Figure 11 : Instrumentation pour l'essai de perméabilité pneumatique sur un puits .....	22
Figure 12 : Pompes utilisées pour la purge et l'échantillonnage des puits d'observation .....	23
Figure 13 : Illustration de diverses procédures d'échantillonnage et d'analyse in-situ.....	24
Figure 14 : Localisation des échantillons selon les types de puits .....	25
Figure 15 : Photo des capteurs à trois composantes des ondes sismiques .....	27
Figure 16 : Localisation des levés sismiques de l'automne 2013 avec, en arrière-plan, la dérivée première du levé aéromagnétique régional.....	27
Figure 17 : Exemple d'un profil de réflexion sismique.....	28
Figure 18 : Exemple de formulaire de saisie pour la localisation d'un objet.....	30
Figure 19 : Exemple de formulaire de saisie pour les observations liées à un objet.....	30

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1 : Exemple de questionnaire pour l'utilisation de l'eau
Annexe 2 : Journaux de forage et détails d'aménagement des puits
Annexe 3 : Cahiers des observations de terrain
Annexe 4 : Protocole d'échantillonnage de l'eau souterraine
Annexe 5 : Liste des analyses réalisées sur les échantillons d'eau souterraine





## **1 INTRODUCTION**

Ce rapport d'étape présente l'avancement du projet d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines en Chaudière-Appalaches durant l'année financière 2013-2014. Une description des travaux de terrain, de même qu'un sommaire des données, cartes et résultats dont l'interprétation et le traitement sont réalisés ou en cours de réalisation y sont aussi présentés.

Ce projet est réalisé dans le cadre du « Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec » (PACES) sous la responsabilité du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP). Ce programme vise à dresser un portrait de la ressource en eau souterraine des territoires municipalisés du Québec méridional, dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité. En 2009, la première phase du programme a permis de cibler cinq régions, soient la Montérégie Est, le Saguenay-Lac St-Jean, l'Abitibi-Témiscamingue (partie Est), Bécancour et le sud-ouest de la Mauricie. Lors de la seconde phase débutée en 2010, deux régions supplémentaires ont été ciblées, soient l'Outaouais et la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ). Une troisième phase, présentement en cours, inclut la région de la Chaudière-Appalaches ainsi que cinq autres régions : Bas-Saint-Laurent, Charlevoix-Haute-Côte-Nord, Vaudreuil-Soulanges, Nicolet-Bas-Saint-François et Abitibi-Témiscamingue (partie Ouest).

## **2 DESCRIPTION DU PROJET**

### **2.1 Objectif du projet**

Ce projet vise à dresser le portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches afin de pouvoir fournir les informations hydrogéologiques nécessaires à la gestion durable des ressources en eau souterraine et orienter les actions prioritaires pour assurer la protection et l'exploitation durable de ces ressources. Les données existantes et celles générées par ce projet seront principalement utilisées pour aider à comprendre les systèmes aquifères. Les principales étapes pour atteindre ces objectifs incluent :

- Compilation et intégration des informations dans une base de données
- Définition des contextes géologiques et hydrogéologiques
- Estimation du bilan hydrique, incluant l'utilisation de l'eau et la recharge des aquifères
- Évaluation de la qualité de l'eau souterraine
- Évaluation de la vulnérabilité des aquifères et du potentiel polluant des diverses activités
- Estimation des débits "durables" d'exploitation pour assurer la pérennité de la ressource
- Production d'une liste de priorités pour la gestion et la protection des ressources régionales en eau souterraine

Le projet devrait avoir les retombées suivantes :

- Améliorer les connaissances sur les ressources en eau souterraine dans la région d'étude, notamment en comblant les manques d'information hydrogéologique locaux
- Fournir une synthèse des connaissances appuyée par une base de données et des cartes hydrogéologiques
- Léguer des infrastructures de surveillance (puits) dans la région qui vont permettre de suivre l'évolution de la qualité et de la quantité des ressources en eau souterraine

- Former du personnel hautement qualifié par l'implication de professionnels et d'étudiants dans la réalisation du projet à travers des projets de recherche de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> cycles
- Établir une approche de gestion et de protection de la ressource basée sur les connaissances acquises ; cette approche doit tenir compte des conditions des systèmes aquifères et intégrer les besoins des différents utilisateurs par le biais des organismes locaux et régionaux intéressés par les ressources en eau souterraine

## 2.2 Territoire visé

La zone d'étude du projet PACES comprend les neuf municipalités régionales de comté (MRC) constituant la région de la Chaudière-Appalaches. La figure 1 montre les territoires des neuf organismes de bassin versant (OBV) ainsi que le découpage des MRC dans la zone d'étude du projet, qui exclut le territoire de la Ville de Lévis couvert par le projet PACES antérieur de la CMQ. Le secteur d'étude couvre 135 municipalités dont la superficie totale est d'environ 15 600 km<sup>2</sup> et la population combinée de plus de 275 000 personnes (MAMROT, 2013).

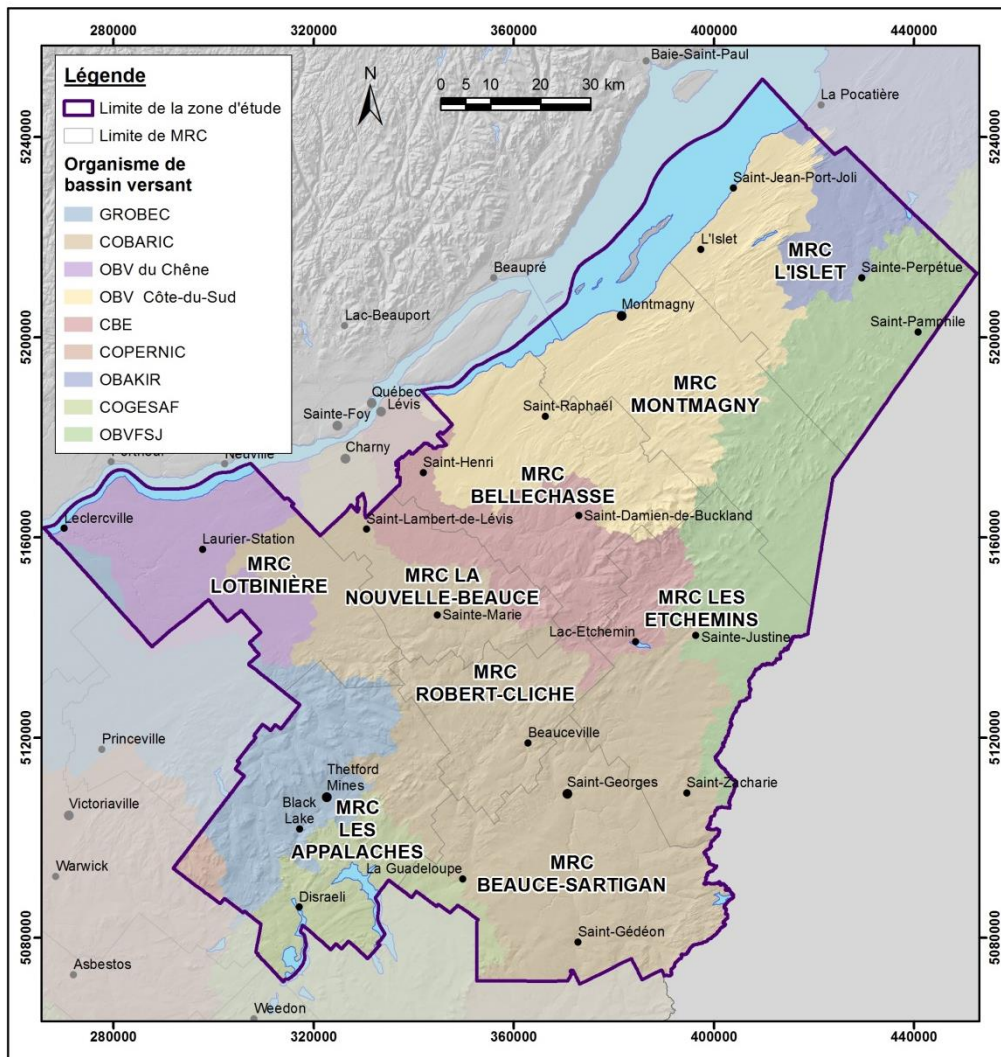


Figure 1 : Région d'étude et limites des OBV et des MRC

### 2.3 Avancement du projet

Ce rapport documente les travaux réalisés durant la seconde année du projet de caractérisation hydrogéologique en Chaudière-Appalaches. L'information est présentée en trois sections :

- Acquisition de données de terrain
- Compilation des données collectées
- Intégration des données sur les forages et les puits

La première section résume les travaux de caractérisation hydrogéologique réalisés durant l'année financière 2013-2014. L'approche de caractérisation hydrogéologique utilisée dans ce projet implique l'emploi combiné de plusieurs méthodes de terrain permettant l'acquisition de données géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et géochimiques. Ces travaux incluent l'échantillonnage d'eau souterraine à partir de puits résidentiels et de puits d'observations implantés dans le cadre du projet. Une campagne de forages incluant des sondages au piézocône (CPT), des sondages par rotopercussion (RPSS) et des forages conventionnels a également été réalisée afin de compléter les données existantes, d'ajouter des données fiables au projet et de compléter le réseau de puits de suivi existants. Les levés géophysiques de sismique réflexion réalisés dans le secteur de Saint-Henri sont en cours d'interprétation afin de vérifier si l'épaisseur et la nature des dépôts meubles de ce secteur pourraient être associées à des paléochenaux de la rivière Etchemin et offrir un potentiel aquifère jusqu'ici inconnu.

La seconde section décrit les travaux réalisés lors de la compilation des données existantes collectées depuis le début du projet. Un effort significatif a été dédié à l'acquisition, la compilation et l'extraction d'informations contenues dans les rapports hydrogéologiques obtenus des municipalités. La collecte de rapports hydrogéologiques, débutée lors de la première phase du projet et réalisée par les OBV-CA, s'est poursuivie durant la seconde phase du projet, notamment afin d'améliorer la couverture de données fiables pouvant être extraites de ces rapports. Plusieurs autres informations, notamment des données hydrométriques, géologiques ainsi que des données sur l'utilisation de l'eau, ont aussi été compilées.

Finalement, la dernière section présente le bilan de l'intégration des différentes données collectées depuis le début du projet à la base de données. Les données intégrées incluent des données sur les forages et les puits extraites des rapports obtenus ainsi que des données de terrain et celles collectées plus tôt dans le projet. Le calendrier des principales activités réalisées lors de la 2<sup>e</sup> phase du projet PACES en Chaudière-Appalaches est présenté au tableau 1.

Tableau 1 : Calendrier des travaux réalisés lors de la seconde phase du projet

Activité	Juin				Juillet					Août					Septembre				Octobre				Novembre				Décembre				
	3	10	17	24	1	8	15	22	29	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	2	9	16	23	30
<b>Géochimie</b>																															
Éch. d'eau sout.																															
<b>Géologie</b>																															
Sondages CPT																															
Forages conv.																															
Carto. quaternaire																															
<b>Hydraulique</b>																															
Essais hydraul.																															
<b>Géophysique</b>																															
Levés sismiques																															
<b>Base de données</b>																															
Intégr. de données																															

### **3 ACQUISITION ET TRAITEMENT DE DONNÉES EXISTANTES**

Au cours de l'année 2013-2014, la collecte de données existantes s'est poursuivie afin de compléter les données acquises lors de la première phase du projet. Certaines données existantes collectées lors de la première phase du projet ont également été compilées et traitées. Dans certains cas, les travaux de compilation et traitement ont impliqué le reformatage de données, la numérisation de documents et de données ainsi que d'autres opérations nécessaires à l'assemblage des jeux de données requis pour la préparation des livrables du projet. Parmi les données existantes acquises et compilées dans la phase 2, on retrouve notamment :

- Données d'utilisation d'eau souterraine (INRS/OBV-CA)
- Données LiDAR pour la mise à jour de la cartographie des formations superficielles (en cours - INRS/CGC)
- Affleurements rocheux (INRS)
- Données liées à la géologie du roc
- Données météorologiques et hydrométriques (IRDA/INRS)
- Données pédologiques (IRDA)
- Données géochimiques des projets antérieurs
- Données extraites de documents collectés

Les sous-sections suivantes fournissent davantage de détail sur certaines des activités et travaux liés à l'acquisition et à la compilation des données existantes.

#### **3.1 Utilisation d'eau souterraine**

L'INRS et les OBV-CA ont travaillé à la collecte et à l'intégration des données sur la consommation d'eau dans la région d'étude, principalement par le biais d'un questionnaire transmis aux municipalités, mais aussi par l'intégration de diverses sources de données disponibles dans les ministères du Gouvernement du Québec (ex. MDDEFP, MAMROT, MAPAQ, etc.). La figure 2 illustre la provenance de l'eau distribuée dans les réseaux pour chaque municipalité ainsi que la localisation des captages municipaux. Lorsqu'il n'y a pas de réseau d'aqueduc, on peut présumer que l'approvisionnement en eau se fait à partir de l'eau souterraine.

La consommation de l'eau découlant des données collectées sera estimée selon trois types d'utilisation, soit agricole, résidentielle, et industrielle/commerciale. Pour chaque type d'utilisation, la provenance de l'eau consommée, soit l'eau de surface ou l'eau souterraine, sera identifiée. La collecte et la compilation de l'étendue des réseaux d'aqueduc municipaux sont en cours. Les informations sur la localisation des réseaux permettront notamment d'estimer la proportion des agriculteurs qui s'alimentent à partir de réseaux par rapport à ceux qui utilisent des puits privés.

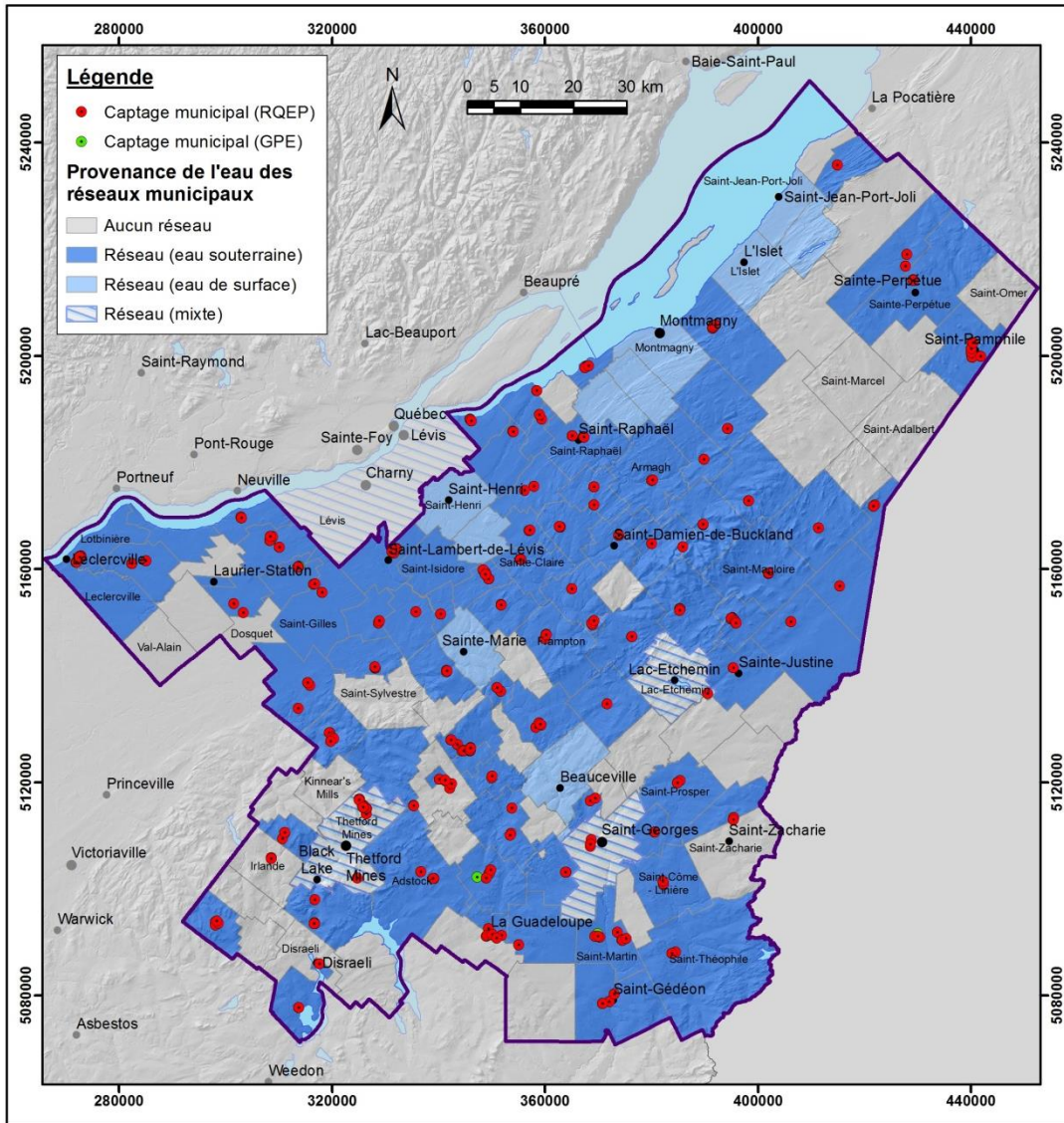


Figure 2 : Provenance de l'eau des réseaux par municipalité et localisation des captages

Pour les besoins résidentiels et commerciaux, un questionnaire rédigé conjointement par l'INRS et les OBV-CA a été envoyé à chacune des municipalités couvertes par le projet. Ce questionnaire a pour but de compléter et de comparer les informations sur la consommation de l'eau provenant du répertoire des réseaux municipaux de distribution d'eau potable du MDDEFP et du Rapport annuel de l'usage de l'eau potable du MAMROT. Au moment de la rédaction de ce rapport, 82 municipalités sur un total de 135 avaient répondu au questionnaire. À noter que certaines des municipalités sont moins concernées par l'usage de l'eau souterraine puisqu'elles ne possèdent aucun système de distribution d'eau municipal. Un exemple du questionnaire est présenté à l'annexe 1.

L'évaluation de la consommation en eau à des fins agricoles sera réalisée à partir des fiches d'enregistrement des entreprises agricoles obtenues du MAPAQ; ces dernières donnent le détail sur le nombre d'unités animales, ainsi que sur les types et les superficies en culture pour chacune des fermes présentes sur le territoire à l'étude.

Finalement, la consommation d'eau à des fins industrielles et commerciales sera évaluée principalement à partir des données provenant du MDDEFP et du registre sur la gestion des prélèvements du MDDEFP. Ces informations sont complétées par les informations fournies par les municipalités et les MRC.

### 3.2 Cartographie de la géologie du Quaternaire

La carte de la géologie du Quaternaire décrivant la nature des dépôts meubles est toujours en cours de révision. La compilation actuellement utilisée a été produite à partir de plusieurs sources d'information, notamment la compilation du MRN (Gaucher, 1984), la carte de Bolduc et al. (2003), les travaux de Caron (2013) ainsi que les travaux de Dubé (1971) (voir les détails dans le rapport de la phase 1 du projet).

L'UQAM, en collaboration avec le MRN, a été mandatée pour mettre à jour la cartographie de la zone d'étude du projet en deux phases (voir figure 3). La première phase de cartographie, dont les travaux étaient prévus pour l'année 2013-2014, couvre les feuillets SNRC suivants : 21E16, 21E15, 21E14, 21L01, 21L02, 21L03, 21L08, 21L07, 21L06, 21L05, 21L11, 21L12. La seconde phase, dont les travaux doivent être réalisés en 2014-2015, couvre les feuillets SNRC restants, soit 21L09, 21L10, 21L15, 21L16, 21M01, 21M08, 21N04, 21N05, 21K12, 21K13. La réalisation de cette deuxième phase de cartographie quaternaire a cependant été remise et pourrait ne pas être réalisée de la même façon que la première phase. Par conséquent, les nouvelles cartes issues de ces travaux ne pourront pas être présentées dans le cadre du présent PACES, dont l'échéance est pour le 31 mars 2015.

Afin de compléter la couverture des affleurements rocheux disponibles en début de projet, plus de 45 000 affleurements ponctuels ont été compilés et numérisés à partir de cartes géologiques existantes (voir figure 4). Ces affleurements ont été ajoutés à ceux disponibles pour obtenir une couverture presque complète de la zone d'étude avec plus de 101 500 affleurements ponctuels. Ces affleurements serviront notamment pour la révision de la cartographie de la géologie du quaternaire ainsi que pour la production de certaines cartes, particulièrement celle représentant l'épaisseur des dépôts meubles.

En complément aux travaux réalisés par l'UQAM, un important travail de cartographie de la géologie du Quaternaire sera réalisé par un étudiant au doctorat en géologie sous la supervision d'un chercheur de la Commission Géologique du Canada. Ce travail qui couvre toute la bordure sud du Fleuve Saint-Laurent dans la zone d'étude (contour rouge, figure 3), est en cours de réalisation à partir des levés LiDAR qui sont disponibles pour ce secteur. Pour tout ce secteur un modèle numérique d'élévation (MNE) avec une précision au mètre en surface et de 0,15 mètre en élévation (Z) a été préparé à partir du LiDAR. Pour générer le MNE à partir des données brutes, un important travail de traitement a été nécessaire. Il faut en premier lieu discerner l'élévation du sol de celle de la canopée. Des analyses de composante principale (PCA) sont utilisées sur le MNE afin de déterminer les axes principaux (orientations cardinales) responsables des variations topographiques. Pour générer les images utilisées pour l'interprétation cartographique, des matrices d'ombrage (*hillshade*) à haute résolution spatiale sont créées en utilisant une illumination artificielle orientée perpendiculairement aux directions identifiées par les PCA. Ces images, complétées par des observations au sol, deviendront autant de sites d'entraînement et permettront de cartographier les formations superficielles du secteur à l'étude avec une précision impossible à atteindre avec les techniques traditionnelles de photo-interprétation.

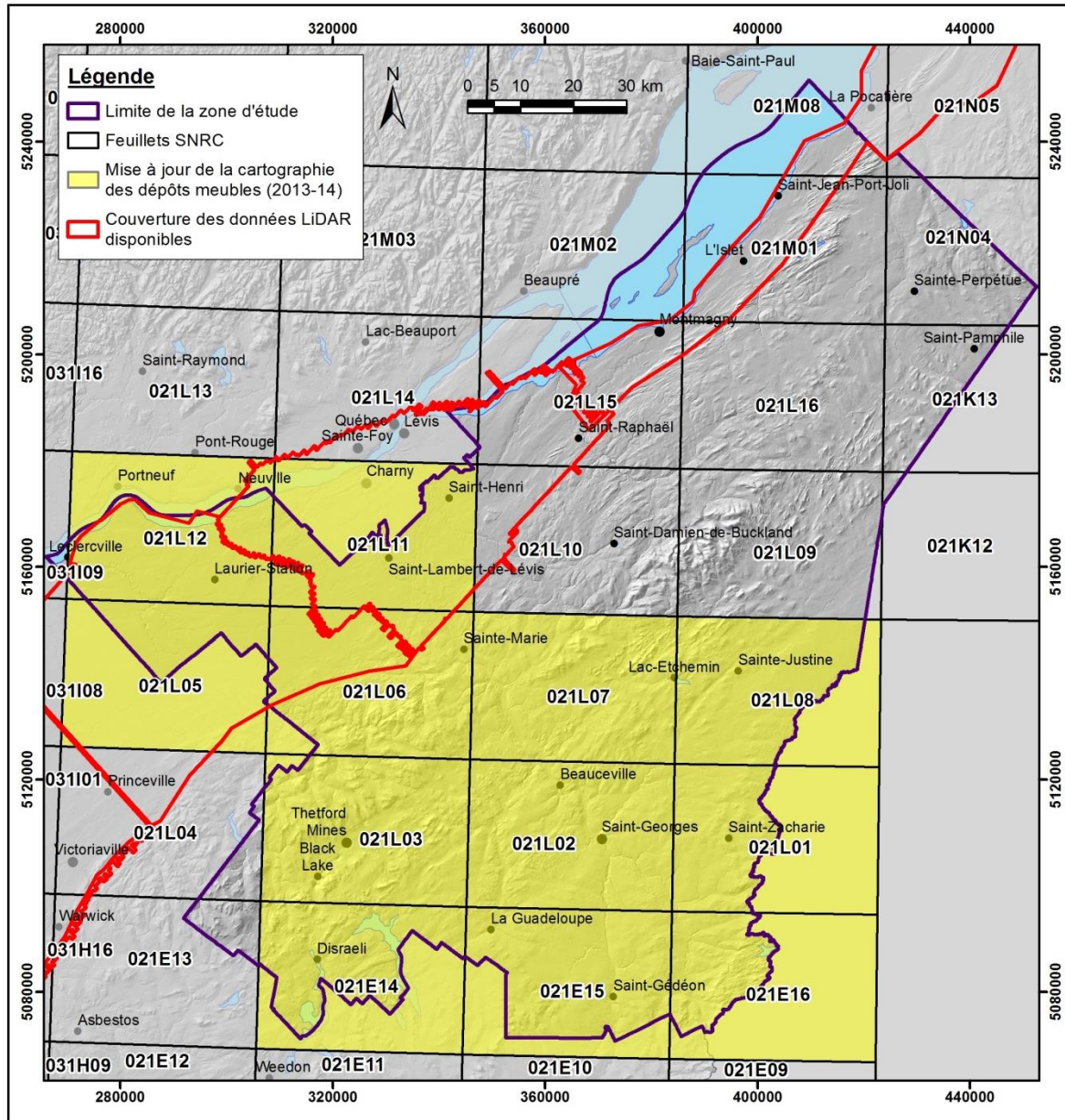


Figure 3 : Feuillets SNRC qui feront l'objet d'une révision de la géologie du Quaternaire dans l'année 2013-2014

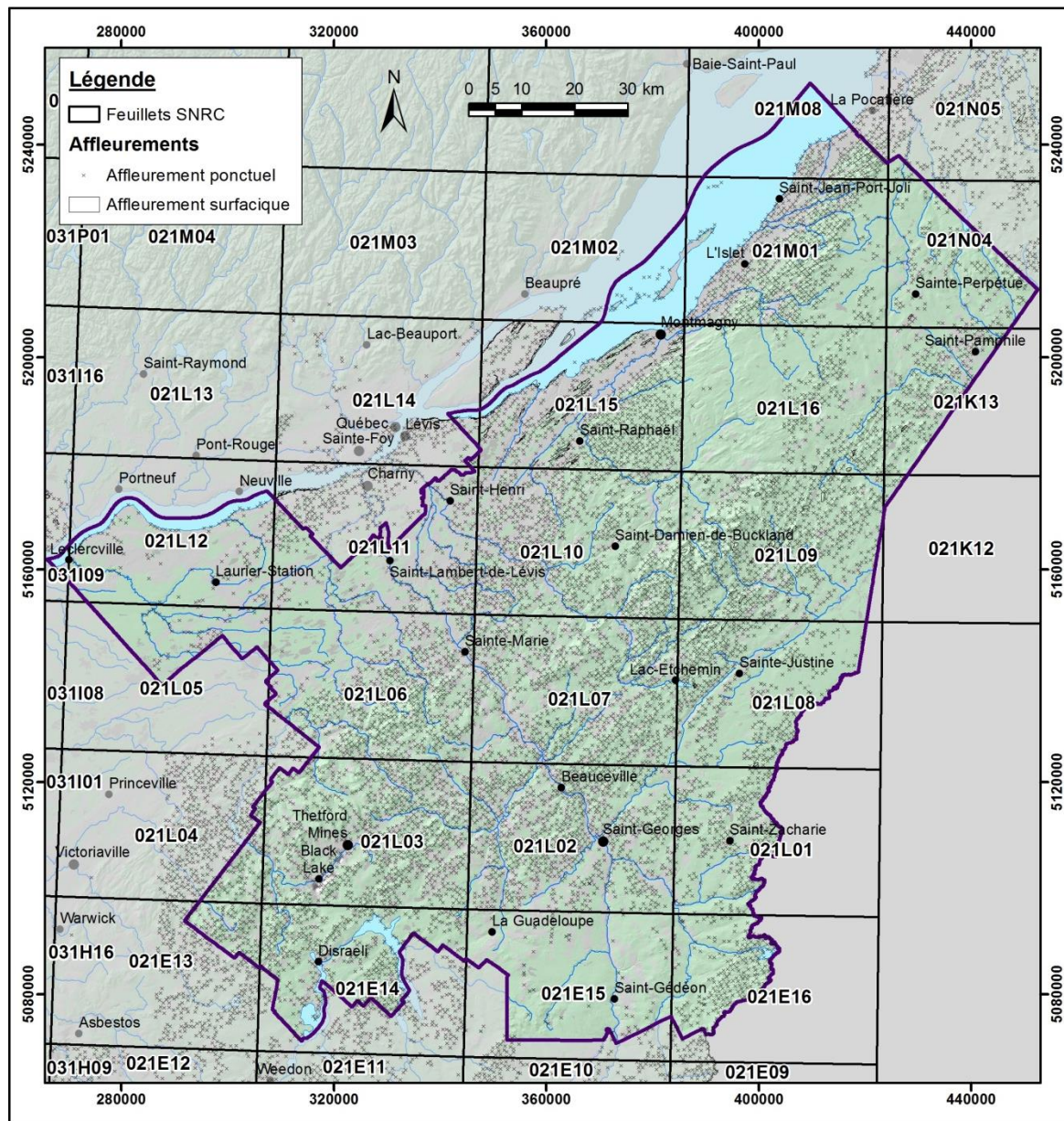


Figure 4 : Compilation des affleurements rocheux dans la zone d'étude

Les possibilités offertes par le LiDAR pour la cartographie quaternaire sont illustrées par les images 1 à 4 de la figure 5 :

- (1) Relief ombragé dérivé d'un MNE 10 m (quelques crêtes visibles, apparence lisse et uniforme);
- (2) Relief ombragé dérivé du LiDAR 1 m (textures contrastées, structures complexes apparentes);
- (3) Cartographie des formations superficielles (Gaucher, 1984 - DV8410, MRNF);
- (4) Cartographie des formations superficielles réalisée à partir du LiDAR 1 m.



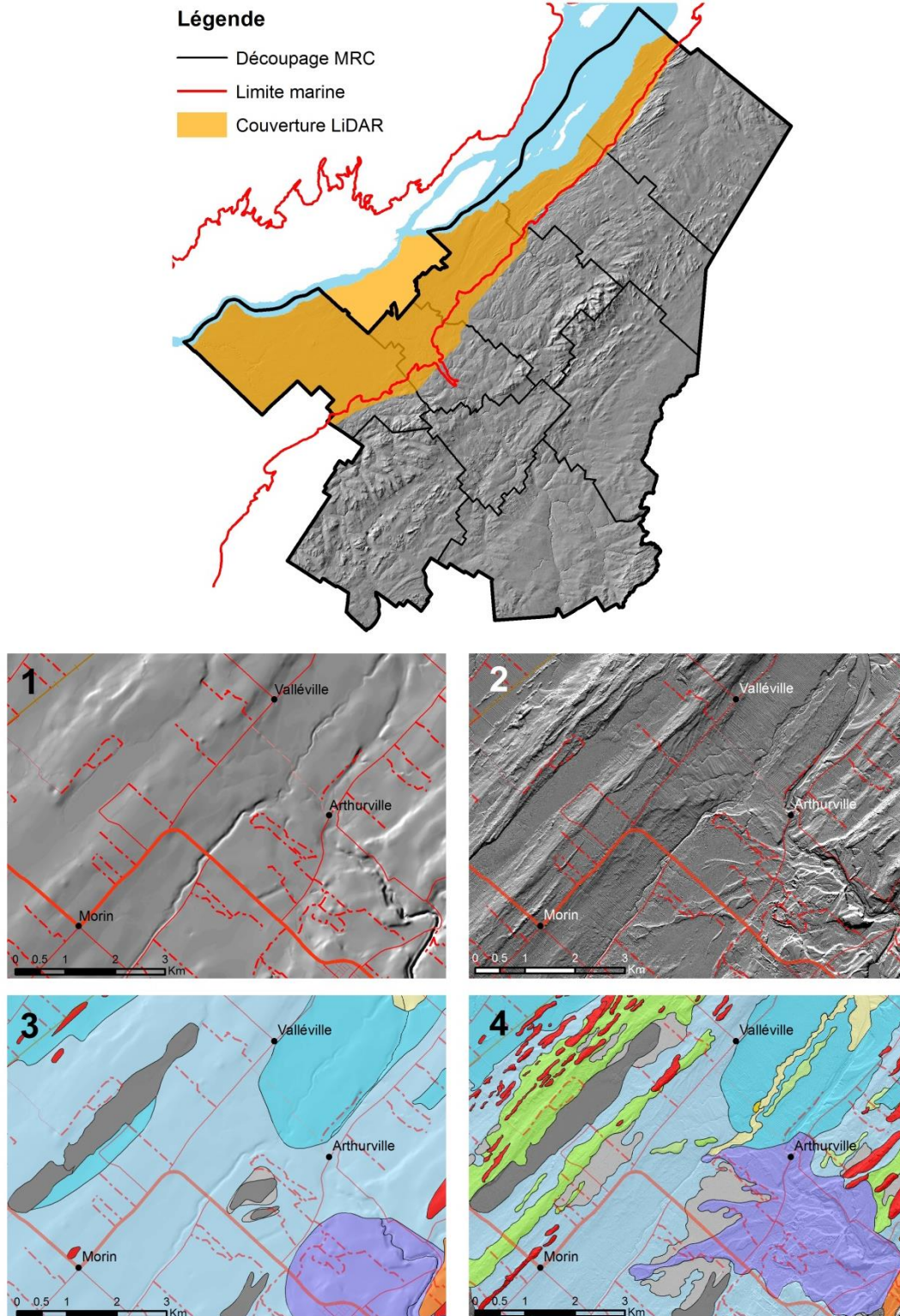


Figure 5 : Exemple de révision de la cartographie de la géologie du Quaternaire à l'aide du LiDAR (comparaison du MNE (1) (MDDEFP) avec le LiDAR (2) et de l'interprétation régionale (Gaucher, 1984) (3) et avec la nouvelle interprétation basée sur le LiDAR (4))

### 3.3 Géologie du roc

Pour les fins du projet, les cartes de la géologie du roc disponibles via le Système d'information géomineire (SIGEOM) ont été simplifiées pour la région d'étude et une légende harmonisée a été préparée. La figure 6 présente les grands contextes géologiques découlant de la compilation révisée. Du nord au sud, on retrouve la Plate-forme du St-Laurent, le Piedmont appalachien constituant les zones de Humber externe et interne, puis la zone de Dunnage et la Ceinture de Gaspé en bordure de la frontière américaine.

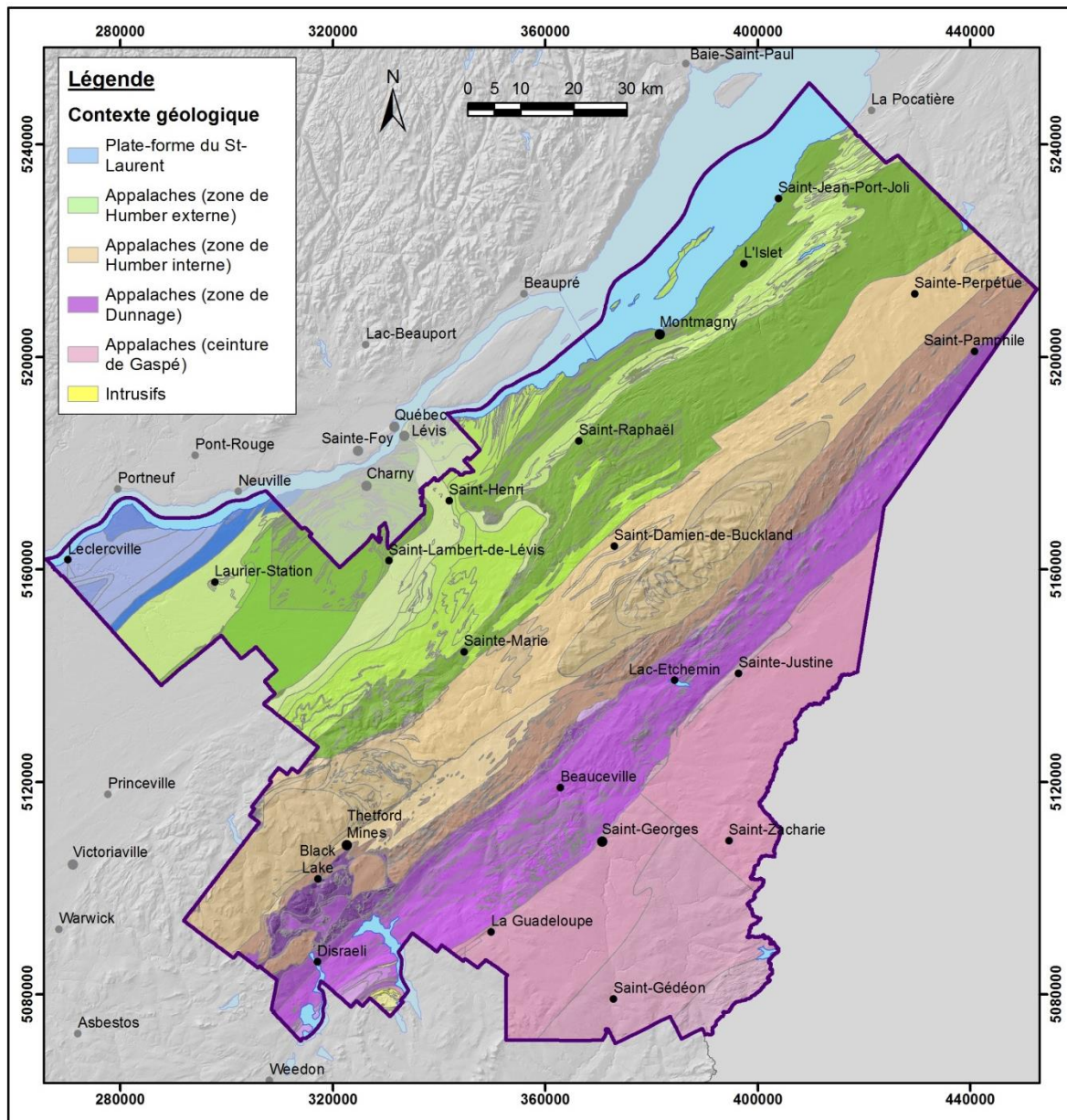


Figure 6 : Géologie du roc simplifiée

### 3.4 Données hydrométriques et pédologiques

Les données météorologiques obtenues lors de la première phase du projet ont été compilées et reformatées pour pouvoir servir à l'évaluation de la recharge et lors de la modélisation hydrologique. Les données manquantes ont été estimées afin d'obtenir un jeu de données complet pour la période 1980-2010 pour les stations météorologiques actives.

En prévision des travaux de modélisation hydrologique, l'IRDA a le mandat de traiter les données hydrométriques obtenues du CEHQ et de formater les séries quotidiennes de débit. Sur le territoire à l'étude, le CEHQ a opéré ou opère 33 stations de jaugeage des débits (figure 7); 21 de ces stations sont inactives, incluant 6 qui possèdent un historique de données de 3.5 à 9 ans se terminant après l'année 2000. Des 12 stations encore ouvertes, toutes possèdent un historique de plus de 16 ans et 10 de plus de 30 ans. Les données de ces stations serviront à estimer les débits de base au cours de la prochaine année. Ces données ont également servi au CEHQ qui nous a transmis les résultats de leur estimation du débit de base. Les données de débit des stations serviront aussi à calibrer la modélisation hydrologique, qui sera réalisée à l'aide du simulateur SWAT dans certains sous-bassins spécifiques de la zone d'étude.

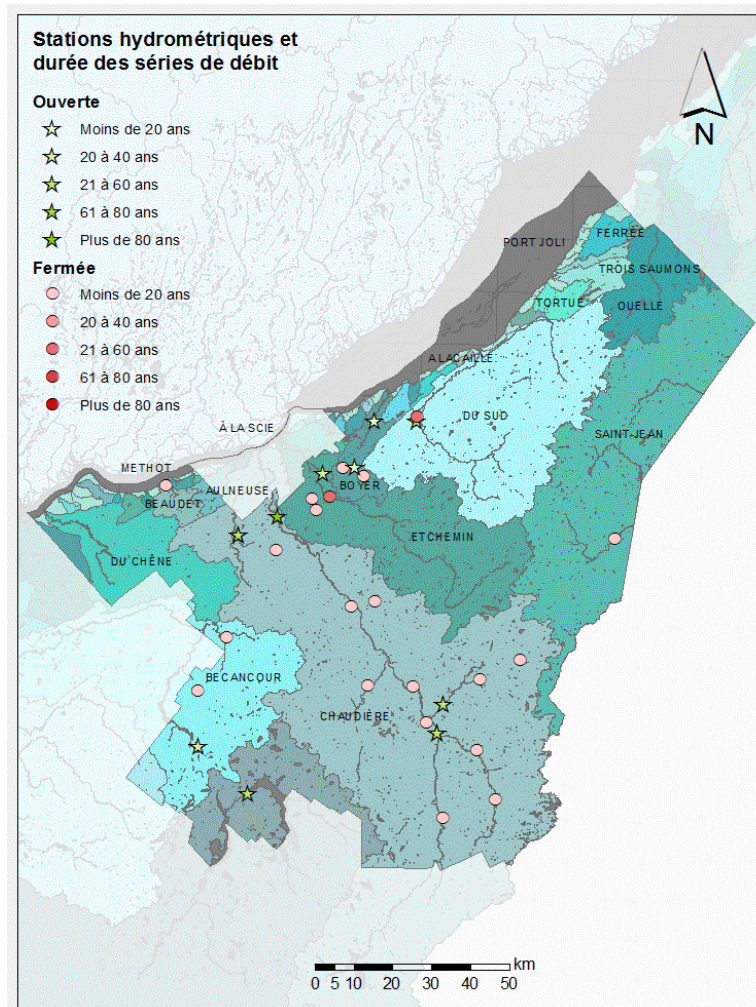


Figure 7 : Localisation des stations hydrométriques et durée des séries de débit

### 3.5 Données extraites des documents collectés

Le travail d'acquisition, de compilation et d'intégration des données extraites de documents collectés s'est poursuivi tout au long de l'année fiscale 2013-2014 avec l'aide des OBV-CA qui coordonnent la recherche d'information auprès des partenaires du projet et 135 municipalités de la zone d'étude. Au moment de la rédaction de ce rapport, plus de 190 documents, principalement des rapports hydrogéologiques, avaient été recueillis, numérisés et traités pour en extraire les données pertinentes au projet. Pour chaque rapport, une autorisation d'utilisation a été obtenue auprès du propriétaire des données. Les données extraites de ces documents sont jugées fiables pour la plupart et permettent de valider les données provenant d'autres sources qui sont généralement jugées moins fiables. Au total, 526 forages et puits ont été extraits des documents collectés dont certains correspondent à des ouvrages de captage municipaux. Le tableau 2 présente le bilan des documents collectés par municipalité ainsi que le type d'approvisionnement des municipalités.

Tableau 2 : Bilan des documents obtenus auprès des municipalités et partenaires du projet

MRC	Municipalité	Approvisionnement en eau		Nombre de rapports
		Type	Nb de puits	
Beauce-Sartigan	La Guadeloupe	Eau souterraine	7	-
	Lac-Poulin	Aucun réseau	-	-
	Notre-Dame-des-Pins	Eau souterraine	2	2
	Saint-Benoît-Labre	Eau souterraine	2	1
	Saint-Côme - Linière	Eau souterraine	4	-
	Saint-Éphrem-de-Beauce	Eau souterraine	4	3
	Saint-Évariste-de-Forsyth	Aucun réseau	-	-
	Saint-Gédéon-de-Beauce	Eau souterraine	3	3
	Saint-Georges	Mixte	4	-
	Saint-Hilaire-de-Dorset	Aucun réseau	-	-
	Saint-Honoré-de-Shenley	Eau souterraine	1	-
	Saint-Martin	Eau souterraine	7	-
	Saint-Philibert	Eau souterraine	2	1
	Saint-René	Aucun réseau	-	-
	Saint-Simon-les-Mines	Aucun réseau	-	-
Bellechasse	Saint-Théophile	Eau souterraine	2	5
	Armagh	Eau souterraine	2	5
	Beaumont	Eau souterraine	3	2
	Honfleur	Eau souterraine	2	-
	La Durantaye	Eau souterraine	2	1
	Notre-Dame-Auxiliatrice-de-Buckland	Eau souterraine	1	5
	Saint-Anselme	Rivière	-	-
	Saint-Charles-de-Bellechasse	Eau souterraine	2	8
	Saint-Damien-de-Buckland	Eau souterraine	2	4
Sainte-Claire	Eau souterraine	3	4	

Tableau 2 : Bilan des documents obtenus auprès des municipalités et partenaires (suite)

MRC	Municipalité	Approvisionnement en eau		Nombre de rapports
		Type	Nb de puits	
Bellechasse (suite)	Saint-Gervais	Eau souterraine	2	2
	Saint-Henri	Rivière	-	-
	Saint-Lazare-de-Bellechasse	Eau souterraine	3	-
	Saint-Léon-de-Standon	Eau souterraine	2	1
	Saint-Malachie	Eau souterraine	5	3
	Saint-Michel-de-Bellechasse	Eau souterraine	2	4
	Saint-Nazaire-de-Dorchester	Aucun réseau	-	-
	Saint-Nérée-de-Bellechasse	Eau souterraine	4	7
	Saint-Philémon	Eau souterraine	4	4
	Saint-Raphaël	Eau souterraine	5	-
	Saint-Vallier	Aucun réseau	-	-
La Nouvelle-Beauce	Frampton	Eau souterraine	3	2
	Saint-Bernard	Eau souterraine	1	3
	Sainte-Hénédine	Eau souterraine	7	2
	Saint-Elzéar	Eau souterraine	3	3
	Sainte-Marguerite	Eau souterraine	2	2
	Sainte-Marie	Mixte	2	2
	Saint-Isidore	Eau souterraine	3	2
	Saint-Lambert-de-Lauzon	Eau souterraine	4	-
	Saints-Anges	Aucun réseau	-	-
	Scott	Eau souterraine	2	1
	Vallée-Jonction	Eau souterraine	3	5
Les Appalaches	Adstock	Eau souterraine	4	-
	Beaulac-Garthby	Eau souterraine	2	-
	Disraeli - paroisse	Aucun réseau	-	-
	Disraeli - ville	Eau souterraine	1	1
	East Broughton	Eau souterraine	5	3
	Irlande	Aucun réseau	-	-
	Kinnear's Mills	Aucun réseau	-	-
	Sacré-Coeur-de-Jésus	Aucun réseau	-	-
	Saint-Adrien-d'Irlande	Eau souterraine	4	-
	Sainte-Clotilde-de-Beauce	Aucun réseau	-	-
	Sainte-Praxède	Aucun réseau	-	-
	Saint-Fortunat	Eau souterraine	4	1
	Saint-Jacques-de-Leeds	Eau souterraine	5	2
	Saint-Jacques-le-Majeur-de-Wolfestown	Aucun réseau	-	-
	Saint-Jean-de-Brébeuf	Aucun réseau	-	-
Saint-Joseph-de-Coleraine	Eau souterraine	4	4	

Tableau 2 : Bilan des documents obtenus auprès des municipalités et partenaires (suite)

MRC	Municipalité	Approvisionnement en eau		Nombre de rapports
		Type	Nb de puits	
Les Appalaches (suite)	Saint-Julien	Aucun réseau	-	-
	Saint-Pierre-de-Broughton	Eau souterraine	1	3
	Thetford Mines	Mixte	22	13
Les Etchemins	Lac-Etchemin	Mixte	1	2
	Saint-Benjamin	Aucun réseau	-	-
	Saint-Camille-de-Lellis	Eau souterraine	1	1
	Saint-Cyprien	Aucun réseau	-	-
	Sainte-Aurélie	Eau souterraine	2	5
	Sainte-Justine	Eau souterraine	2	-
	Sainte-Rose-de-Watford	Aucun réseau	-	-
	Sainte-Sabine	Eau souterraine	11	1
	Saint-Louis-de-Gonzague	Aucun réseau	-	-
	Saint-Luc-de-Bellechasse	Eau souterraine	5	-
	Saint-Magloire	Eau souterraine	2	2
	Saint-Prosper	Eau souterraine	2	3
	Saint-Zacharie	Eau souterraine	2	-
L'Islet	L'Islet	Rivière	-	-
	Saint-Adalbert	Aucun réseau	-	-
	Saint-Aubert	Lac	-	-
	Saint-Cyrille-de-Lessard	Aucun réseau	-	-
	Saint-Damase-de-L'Islet	Aucun réseau	-	-
	Sainte-Félicité	Aucun réseau	-	-
	Sainte-Louise	Eau souterraine	1	2
	Sainte-Perpétue	Eau souterraine	2	-
	Saint-Jean-Port-Joli	Lac	-	-
	Saint-Marcel	Aucun réseau	-	-
	Saint-Omer	Aucun réseau	-	-
	Saint-Pamphile	Eau souterraine	7	2
	Saint-Roch-des-Aulnaies	Eau souterraine	3	-
Tourville	Eau souterraine	2	1	
Lotbinière	Dosquet	Aucun réseau	-	-
	Laurier-Station	Eau souterraine	-	2
	Leclercville	Eau souterraine	2	3
	Lotbinière	Eau souterraine	9	1
	Notre-Dame-du-Sacré-Coeur-d'Issoudun	Aucun réseau	-	-
	Saint-Agapit	Eau souterraine	5	3
	Saint-Antoine-de-Tilly	Eau souterraine	2	-
Saint-Apollinaire	Eau souterraine	5	5	

Tableau 2 : Bilan des documents obtenus auprès des municipalités et partenaires (suite)

MRC	Municipalité	Approvisionnement en eau		Nombre de rapports
		Type	Nb de puits	
Lotbinière (suite)	Sainte-Agathe-de-Lotbinière	Eau souterraine	4	1
	Sainte-Croix	Eau souterraine	2	4
	Saint-Édouard-de-Lotbinière	Eau souterraine	3	2
	Saint-Flavien	Eau souterraine	2	-
	Saint-Gilles	Eau souterraine	1	2
	Saint-Janvier-de-Joly	Aucun réseau	-	-
	Saint-Narcisse-de-Beaurivage	Eau souterraine	2	2
	Saint-Patrice-de-Beaurivage	Eau souterraine	3	2
	Saint-Sylvestre	Aucun réseau	-	-
	Val-Alain	Aucun réseau	-	-
Montmagny	Berthier-sur-Mer	Eau souterraine	5	3
	Cap-Saint-Ignace	Eau souterraine	11	4
	Lac-Frontière	Eau souterraine	2	2
	Montmagny	Rivière	-	-
	Notre-Dame-du-Rosaire	Eau souterraine	2	3
	Saint-Antoine-de-l'Isle-aux-Grues	Aucun réseau	-	-
	Sainte-Apolline-de-Patton	Aucun réseau	-	-
	Sainte-Euphémie-sur-Rivière-du-Sud	Eau souterraine	1	1
	Sainte-Lucie-de-Beauregard	Aucun réseau	-	-
	Saint-Fabien-de-Panet	Eau souterraine	1	3
	Saint-François-de-la-Rivière-du-Sud	Rivière	-	-
	Saint-Just-de-Bretenières	Eau souterraine	1	1
	Saint-Paul-de-Montminy	Eau souterraine	2	1
Saint-Pierre-de-la-Rivière-du-Sud	Rivière	-	5	
Robert-Cliche	Beauceville	Rivière	-	-
	Saint-Alfred	Aucun réseau	-	1
	Saint-Frédéric	Eau souterraine	4	1
	Saint-Joseph-de-Beauce	Eau souterraine	4	2
	Saint-Joseph-des-Érables	Aucun réseau	-	-
	Saint-Jules	Eau souterraine	2	2
	Saint-Odilon-de-Cranbourne	Eau souterraine	1	1
	Saint-Séverin	Aucun réseau	-	-
	Saint-Victor	Eau souterraine	3	2
Tring-Jonction	Eau souterraine	12	3	
<b>Total</b>			<b>293</b>	<b>195</b>

Quelques autres documents pertinents (environ une quinzaine) identifiés avec l'aide des municipalités, des MRC et de la Direction régionale de la Chaudière-Appalaches du MDDEFP

restent encore à venir. Les démarches ont toutefois été entamées afin d'obtenir ces documents ainsi qu'une autorisation d'utilisation. Finalement, les documents collectés auprès des municipalités ont également permis de numériser et de compiler les aires d'alimentation des puits municipaux pour lesquels des informations sont disponibles. Lorsque ces travaux seront complétés, plus de 130 aires d'alimentation devraient être disponibles pour la zone d'étude.

## **4 ACQUISITION DE DONNÉES DE TERRAIN**

Une des activités principales de la seconde phase du projet (année financière 2013-1014) consistait en la réalisation d'une importante campagne de travaux de terrain. Les travaux se sont principalement déroulés des mois de mai à novembre 2013 et ont permis de couvrir l'ensemble du territoire d'étude, soit plus de 15 000 km<sup>2</sup>. Toutes les données issues de ces travaux ont été intégrées à la base de données terrain et leur interprétation se fera principalement au cours de la prochaine année. Un sommaire des activités réalisées est présenté ci-dessous :

- Sondages au piézocône (11) et sondage par rotopercussion (24) avec la foreuse de l'INRS pour définir la séquence de sédiments et valider l'interprétation des levés géophysiques; certains puits d'observation peu profonds ont également été installés dans les dépôts meubles par enfouissement lors de ces travaux;
- Forages conventionnels (9) et aménagement de puits d'observation au roc; ces puits seront légués au MDDEFP de façon à accroître le Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec et ainsi suivre l'évolution du niveau de l'eau souterraine à long terme dans la région d'étude;
- Mise en place de capteurs de pression dans les puits d'observation pour suivre les fluctuations du niveau d'eau souterraine;
- Essais de perméabilité dans les puits accessibles;
- Échantillonnage de l'eau souterraine dans les puits aménagés dans le cadre du projet et dans plusieurs puits résidentiels répartis sur le territoire à l'étude (141 échantillons incluant 10 duplicatas); ces échantillons ont été analysés pour définir la composition chimique de l'eau souterraine, mais aussi, pour certains échantillons, les compositions isotopiques (<sup>14</sup>C, tritium, <sup>2</sup>H, <sup>18</sup>O) ainsi que la concentration en méthane dissous et sa signature isotopique;
- Réalisation d'environ 5 km de levés géophysiques de sismique réflexion.

L'ensemble de ces travaux est décrit plus en détail ci-dessous. Chaque sous-section couvre l'objectif des travaux, la méthodologie employée et fait une synthèse des travaux réalisés avec, dans certains cas, un exemple de résultats.

### **4.1 Sondages au piézocône (CPT)**

#### **Objectif**

Les sondages au piézocône ou sondages CPT (*Cone Penetration Test*) et les sondages par rotopercussion ou sondages RPSS (*RotoPercussion Sounding System*) ont pour objectif d'obtenir des informations qui vont servir de points de contrôle pour la stratigraphie des dépôts meubles et confirmer, si possible, la profondeur au roc. L'utilisation des résultats des sondages permet de valider l'interprétation des données existantes (ex. forages provenant du Système d'information Hydrogéologique - SIH) ou celles acquises durant le projet (ex.: levés géophysique ou autres types de forage). Les sondages sont prioritairement localisés dans les



secteurs où un manque d'information est observé ou pour lesquels des besoins spécifiques de caractérisation ont été identifiés. Lorsque pertinent, les sondages ont été aménagés en puits d'observation afin de pouvoir échantillonner l'eau souterraine et réaliser des essais hydrauliques.

### Méthodologie

Les sondages ont été effectués à l'aide de la foreuse géotechnique multifonctionnelle de l'INRS (Geotech 605D) (figure 8). Cette foreuse est équipée de deux têtes de forage qui permettent soit l'enfoncement pour l'utilisation du CPT, soit la rotation et percussion pour le RPSS. La foreuse est équipée d'un système d'acquisition de données qui enregistre en temps réel les différents paramètres de forage permettant une interprétation préliminaire des profils stratigraphiques lors des travaux.

La méthode par CPT permet l'enfoncement d'une sonde dans des contextes de sols meubles relativement fins, dont la texture varie généralement de l'argile au sable. Ce système mesure les paramètres physiques des sols (i.e. friction, résistance en pointe, pression d'eau, résistivité, teneur en eau dans la zone saturée). L'interprétation des différents paramètres permet de classer les sols sur la base de chartes existantes (Lunne et al., 1997; Fellenius et Eslami, 2000). La profondeur d'investigation maximale est d'environ 50 m selon les conditions de terrain.

La méthode par forage RPSS utilise un taillant au carbure (*button bit*) et un marteau hydraulique, le tout fonctionnant avec de l'air comprimé pour éjecter les déblais de forage. Le système RPSS procure aussi un profil en continu des différents paramètres de forage durant l'enfoncement (i.e. pression à l'enfoncement, vitesse et pression de rotation de la tête, pression et vitesse de la percussion du marteau, pression et débit de l'air comprimé, etc.). Le système peut aussi être utilisé pour faire des installations de puits d'observation par enfoncement du tubage (i.e. tubage en acier de 2.25 po et 3.25 po) ou par percussion jusqu'à une profondeur maximale d'environ 30 m. Les paramètres mesurés en RPSS permettent de déterminer l'énergie requise en fonction de la vitesse de pénétration et d'identifier grossièrement les types de formations géologiques rencontrées et la profondeur des interfaces entre chaque type de matériaux, notamment la profondeur au roc. Ce mode de sondage permet la caractérisation des sols plus grossiers (ex. sols avec cailloux et blocs) et des massifs rocheux. Les équipements de la foreuse Geotech permettent aussi d'échantillonner les sols afin d'aider à l'interprétation des données provenant du système d'acquisition.



Figure 8 : Travaux de forages avec la foreuse Geotech 605D de l'INRS

Description des travaux

Pour la campagne de terrain de l'été 2013, la localisation des sondages sur le territoire d'étude s'est faite de façon à bien représenter les différents contextes hydrostratigraphiques en utilisant les informations existantes (i.e. base de données existantes de forages telles SIH et MTQ, cartes géologiques du roc et des formations superficielles). Chaque emplacement a dû être localisé et confirmé sur le terrain en fonction des contraintes des lieux et en accord avec les propriétaires. En tout, 35 sites de sondages ont été visités (figure 9) sur lesquels 11 CPT et 24 RPSS ont été réalisés avec des profondeurs variant entre 3.5 et 65 m, pour un total de plus 430 m. De plus, 19 puits d'observation de petit diamètre (1 po ou 2.5 cm) ont été installés pour l'échantillonnage de l'eau souterraine et la réalisation d'essais hydrauliques.

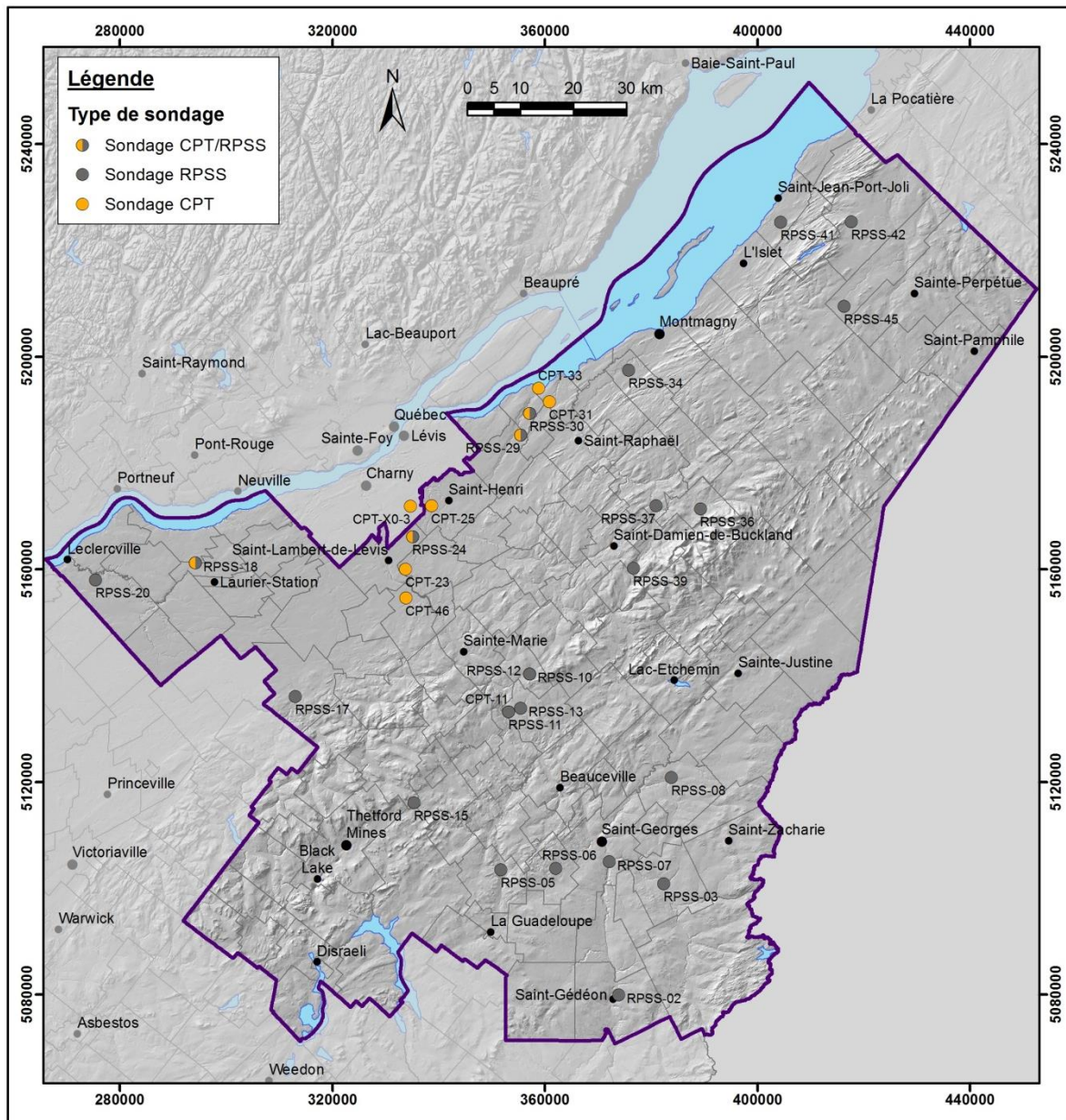


Figure 9 : Emplacement des sondages CPT et RPSS

Les journaux de forage sont présentés à l'annexe 2 en version préliminaire. Les journaux sont réalisés à l'aide du logiciel Strater® et de fonctions développées spécifiquement pour le projet dans Excel. Les résultats provenant des différents travaux de sondage vont notamment servir à l'interprétation des données existantes ou encore au calage de données provenant des autres méthodes d'investigation, en particulier pour les levés géophysiques.

## 4.2 Forages conventionnels

### Objectif

Le but des forages conventionnels au roc était d'installer des puits d'observation pour faire le suivi à long terme des variations du niveau de la nappe ainsi que de la qualité de l'eau souterraine. Outre la confirmation de la profondeur au roc, l'installation des puits ouverts dans l'aquifère de roc permet également d'effectuer des essais hydrauliques (ex. essais de perméabilité). Lors de la réalisation des forages, la description des unités géologiques est effectuée à l'aide de l'échantillonnage des déblais de forage. Il est aussi possible que certains puits servent à la réalisation de diagraphies (été 2014) pour caractériser les fractures.

### Méthodologie

La localisation des puits a été choisie en se basant sur les informations existantes, principalement les forages et puits (ex. SIH, MTQ, etc.), mais aussi à partir de cartes géologiques, de levés géophysiques et des données géochimiques. Prioritairement, les puits d'observation ont été localisés en tenant compte des puits déjà existants du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec. Comme pour les sondages CPT et RPSS, chaque emplacement a dû être localisé et confirmé sur le terrain en fonction des contraintes des lieux et en accord avec les propriétaires.

### Description des travaux

Les travaux de forages se sont déroulés du 11 au 20 septembre 2013. Au total, 288 m ont été forés, dont environ 170 m dans le roc. Tous les forages ont été aménagés en puits (figure 10). Ces derniers ont un diamètre de 150 mm (6 po) et sont forés à une profondeur minimale de 15 m dans le roc afin d'en évaluer les caractéristiques hydrauliques et la qualité de l'eau souterraine représentative de la partie supérieure de l'aquifère. Durant les opérations de forage, les matériaux de déblais ont été échantillonnés et décrits afin d'aider à définir la séquence stratigraphique des dépôts meubles et du roc.

Des capteurs de pression ont été mis en place dans tous les puits aménagés et une visite de terrain est prévue au printemps prochain afin de recueillir les enregistrements des capteurs de pression qui permettront d'évaluer les variations journalières du niveau de la nappe. Ces variations de niveau d'eau permettent d'évaluer les conditions de recharge ainsi que les conditions de confinement de l'aquifère au roc. Des essais hydrauliques ont également été effectués à l'automne 2013 et sont en cours d'interprétation.

Les puits aménagés dans le cadre du projet PACES seront légués en fin de projet au MDDEFP dans le but de bonifier leur Réseau de surveillance. Pour chaque puits, une entente de deux ans a été signée entre l'INRS et les propriétaires. Par conséquent, le MDDEFP devra signer une nouvelle entente avec ceux-ci afin d'intégrer les puits à leur réseau.

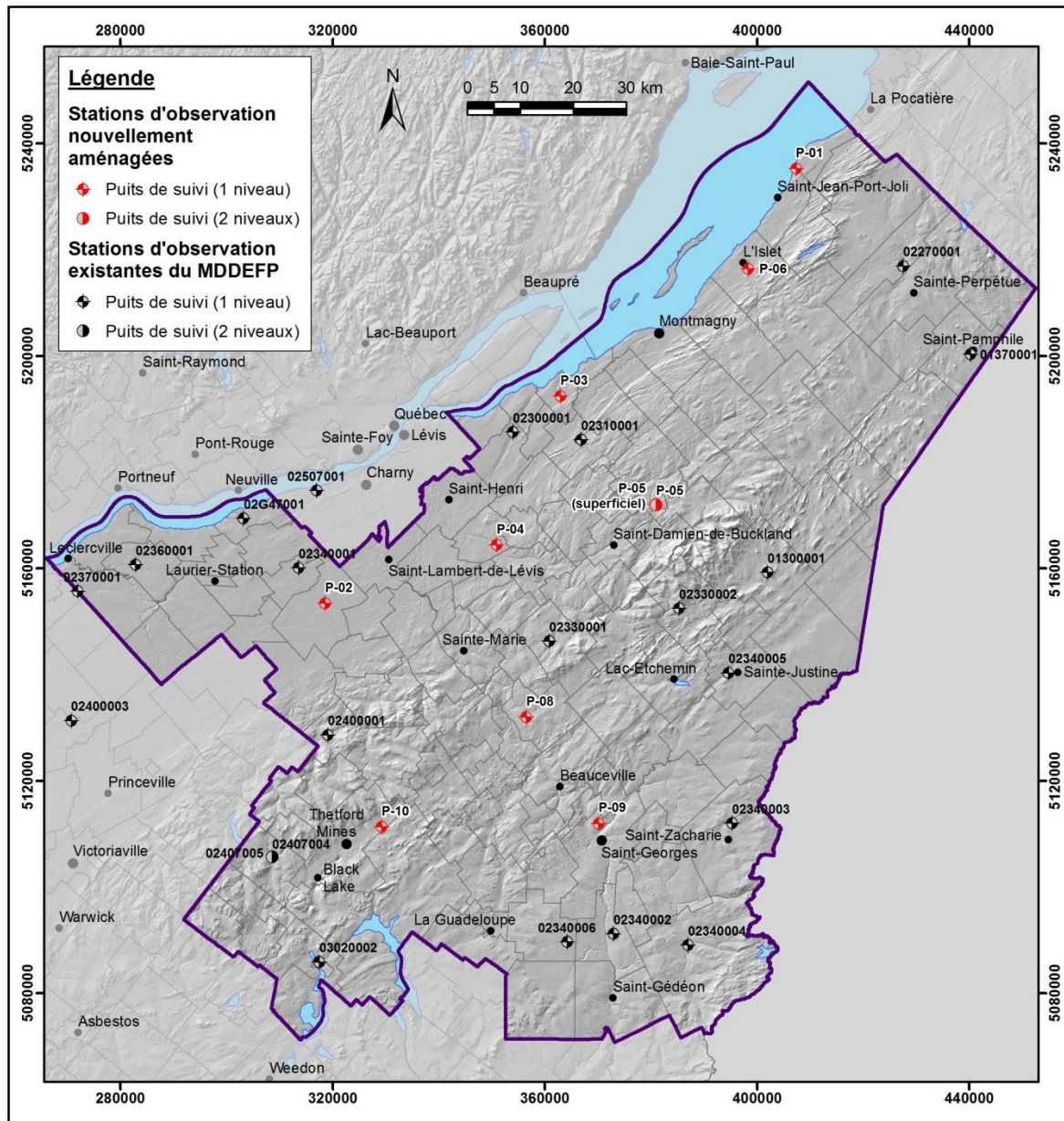


Figure 10 : Emplacement des forages conventionnels

### 4.3 Installation de capteurs de pression

#### Objectif

Les capteurs de pression servent à enregistrer les fluctuations de la nappe de façon régulière et continue. Ces données sont notamment utilisées pour estimer la recharge des aquifères. À long terme, les données peuvent servir pour estimer l'impact des changements climatiques ou d'activités anthropiques sur les taux d'utilisation des ressources en eau souterraine.

## Méthodologie

Les capteurs de pression sont installés à une profondeur suffisante pour qu'ils ne soient pas dénoyés en période d'étiage (en fonction du rabattement annuel approximatif de la nappe). La profondeur d'installation des capteurs doit aussi respecter la profondeur maximale fixée par le fabricant, qui dépend du type de capteur de pression. Des enregistrements à un intervalle de 6 h ont été programmés afin de bien capter les fluctuations quotidiennes de la nappe dues aux changements de pression atmosphérique (dans le cas d'une nappe captive) ou à l'infiltration des précipitations (pour une nappe libre).

### Description des travaux

Neuf capteurs de pression de 0.75 po de diamètre de la compagnie Solinst® ont été installés à l'été/automne 2013 dans les puits conventionnels. Une visite de terrain est prévue au printemps ou au début de l'été 2014, après la recharge du printemps, afin de recueillir les données de niveaux d'eau enregistrées par les capteurs. Les données seront intégrées à la base de données et interprétées au cours de la prochaine année.

## **4.4 Essais de perméabilité**

### Objectif

Les essais de perméabilité permettent d'obtenir une estimation des valeurs de conductivité hydraulique des formations géologiques granulaires ou de roc à partir de mesures dans les puits. Ce type d'essai, de courte durée, déplace un faible volume d'eau par différentes méthodes et mesure les fluctuations de niveau d'eau qui en découlent. Par conséquent, les propriétés hydrauliques mesurées aux puits lors de ces essais sont considérées comme ponctuelles en comparaison, par exemple, de mesures faites par des essais de longue durée tels des essais de pompage de 72 h ou plus. Cette méthode est cependant très rapide et permet d'obtenir une estimation relativement fiable de la conductivité hydraulique des aquifères en place.

### Méthodologie

Les essais de perméabilité effectués dans le cadre du projet ont été réalisés à l'aide d'un appareil pneumatique (figure 11) qui permet d'augmenter la pression d'air au-dessus de la colonne d'eau du puits pour en rabaisser le niveau (N.B. : le puits est scellé pendant l'essai) ; la pression est ensuite relâchée et la remontée du niveau d'eau est enregistrée par un capteur de pression automatisé.

### Description des travaux

Des essais de perméabilité de courte durée ont été réalisés dans 6 des 9 puits d'observation interceptant l'aquifère de roc fracturé et dans 12 des 19 puits d'observation de plus petit diamètre (1 po et 2 po) aménagés dans des aquifères granulaires. Les données de ces 18 essais sont en cours d'interprétation pour obtenir des valeurs de conductivité hydraulique des unités hydrogéologiques interceptées. Les valeurs obtenues seront comparées avec les résultats extraits des rapports hydrogéologiques et ceux disponibles dans les différentes bases de données existantes.



Figure 11 : Instrumentation pour l'essai de perméabilité pneumatique sur un puits

## 4.5 Échantillonnage de l'eau souterraine

### Objectif

L'objectif de la campagne d'échantillonnage d'eau souterraine dans des puits (au roc ou dans les dépôts granulaires) est d'établir un portrait de la qualité et de la géochimie de l'eau souterraine dans la région d'étude. À la suite de l'échantillonnage, un traitement statistique des résultats d'analyses chimiques permet l'identification des différents groupes d'eau associés à l'aquifère régional de roc fracturé et l'établissement des relations entre ceux-ci, ainsi que l'identification et la compréhension des mécanismes contrôlant la géochimie de ces groupes. Ces travaux et les résultats qui en découlent vont aussi permettre d'améliorer la compréhension du système d'écoulement régional.

### Méthodologie

Afin de déterminer les sites d'échantillonnage, les différents contextes géologiques ont été pris en considération, en plus de la couverture spatiale des puits existants sur le territoire. La campagne d'échantillonnage a été planifiée de façon à assurer une couverture spatiale adéquate considérant les contraintes budgétaires.

La localisation des échantillons résidentiels a été réalisée en considérant un maillage d'environ 10 km<sup>2</sup>. Ce découpage de l'échantillonnage exclut le bassin de la rivière Chaudière déjà caractérisé en 2008 dans le cadre d'un projet financé par le Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec (PAECQ) dont la gestion était assuré par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) (Tecsult, 2008). Pour chacune des cellules de 10 km<sup>2</sup>, une sélection a été faite pour choisir un ou plusieurs puits du répertoire du SIH

(Système d'information hydrogéologique du MDDEFP) possédant une adresse postale. Chaque équipe d'échantillonnage s'est vu attribuer un certain nombre de cellules pour lesquelles elle devait trouver un ou des puits de la liste, obtenir l'autorisation du propriétaire et prélever un échantillon. Les équipes se présentaient directement chez le propriétaire, sans rendez-vous préalable. Lorsqu'aucune autorisation de propriétaire n'était obtenue parmi toutes les adresses répertoriées pour une cellule donnée (i.e. absence des propriétaires ou refus) ou lorsque le contexte était défavorable (ex. présence d'un système de traitement d'eau ou aucun robinet extérieur accessible), un échantillon était alors prélevé chez un voisin ou dans tout autre puits résidentiel aménagé au roc, si possible dans le même secteur. Pour chaque site d'échantillonnage, les informations de base sur les puits ont été obtenues auprès du propriétaire, dont la profondeur et la date de forage lorsqu'elles étaient connues.

Lors de la rencontre avec le propriétaire, un dépliant expliquant les objectifs généraux du projet PACES Chaudière-Appalaches était remis avec le protocole d'échantillonnage. Une série de questions était aussi posée au(x) propriétaire(s) au sujet sur leur perception de la qualité de leur eau. Des informations telles que les coordonnées du propriétaire, la perception de la qualité de l'eau, le type d'utilisation, le débit approximatif du puits, la profondeur et l'année de construction étaient notées dans un cahier d'observation de terrain. Les cahiers des observations sont présentés à l'annexe 3.

Chacun des échantillons a été prélevé conformément au protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine élaboré par l'UQAT dans le cadre du PACES (annexe 4). L'eau des puits d'alimentation privés a été prélevée directement au robinet extérieur des résidences, tout en s'assurant qu'aucun système de traitement n'était présent. Les puits conventionnels avec un diamètre de 150 mm et ont été purgés et échantillonnés avec une pompe électrique de type Redi-Flo2, tandis que les puits construits avec des tubages de PVC de 25 mm ou 50 mm de diamètre ont été purgés et échantillonnés à l'aide d'une pompe de type Waterra (figures 12 et 13).



Figure 12 : Pompes utilisées pour la purge et l'échantillonnage des puits d'observation

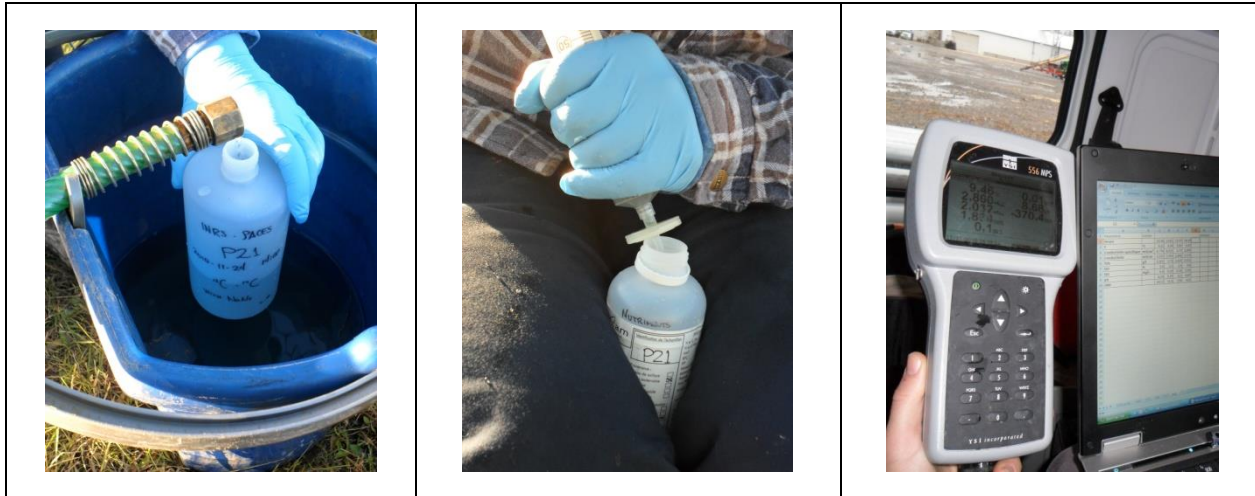


Figure 13 : Illustration de diverses procédures d'échantillonnage et d'analyse in-situ

Avant l'échantillonnage, une purge des puits permet d'obtenir une eau représentative de la formation géologique et le suivi paramètres physico-chimiques, à l'aide d'une sonde multiparamètres de marque YSI. Les paramètres mesurés étaient les suivants : pH, température (°C), oxygène dissous (% et mg/L), solides totaux dissous (mg/L) et conductivité spécifique (mS/cm). L'échantillon était prélevé uniquement lorsque la sonde confirmait une stabilité pour chacun des paramètres pendant au moins 5 minutes. La calibration de l'appareil était effectuée au début de chaque journée.

Le tableau présenté à l'annexe 5 documente les analyses effectuées pour chaque échantillon du projet en indiquant le nom du laboratoire ayant effectué les analyses. Ce tableau présente une synthèse des spécifications et instructions pour le prélèvement d'un échantillon. Tous les échantillons ont été analysés chez Maxxam pour les paramètres de base qui incluent :

- Anions (alcalinité, bromures, chlorures, fluorures, nitrites, nitrates, sulfates)
- Nutriments (azote ammoniacal, phosphore total inorganique)
- Métaux (Al, Li, Sb, Mg, Ag, Mn, As, Mo, Ba, Ni, Be, K, Bi, Pb, B, Se, Ca, Si, Cd, Na, Cr, Sr, Co, Ti, Cu, U, Sn, V, Fe, Zn)
- Sulfures totaux

Des analyses supplémentaires ont été également effectuées par le laboratoire de l'INRS, dont des analyses pour le carbone inorganique dissous (CID), le carbone organique dissous (COD) et l'azote total. De plus, certains échantillons ont été acheminés au laboratoire Delta Lab de la Commission Géologique du Canada (CGC) ainsi qu'à celui de l'université d'Ottawa (Hatch Isotope Laboratories) et celui de l'Université de Waterloo pour les analyses suivantes :

- Gaz dissous (méthane, éthane, propane)
- Isotopes de l'eau ( $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ )
- Datation par le tritium ( $^3\text{H}$ )
- Datation par les isotopes du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $^{14}\text{C}$ )

Finalement, les résultats d'analyses pour les paramètres de base effectuées sur l'eau souterraine de puits résidentiels ont été transmis aux propriétaires à l'automne 2013, en soulignant s'il y avait des dépassements de normes esthétiques ou pour la santé.



### Description des travaux d'échantillonnage

La campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine a été complétée à l'automne 2013 avec un total de 141 échantillons prélevés (103 puits résidentiels, 28 puits aménagés dans le cadre du projet et 10 duplicata). Bien que les derniers travaux d'échantillonnage aient été réalisés en octobre sur les 9 puits conventionnels, la majorité des échantillons ont été prélevés avant la mi-août. La figure 14 présente la localisation des puits en fonction des types d'aménagement.

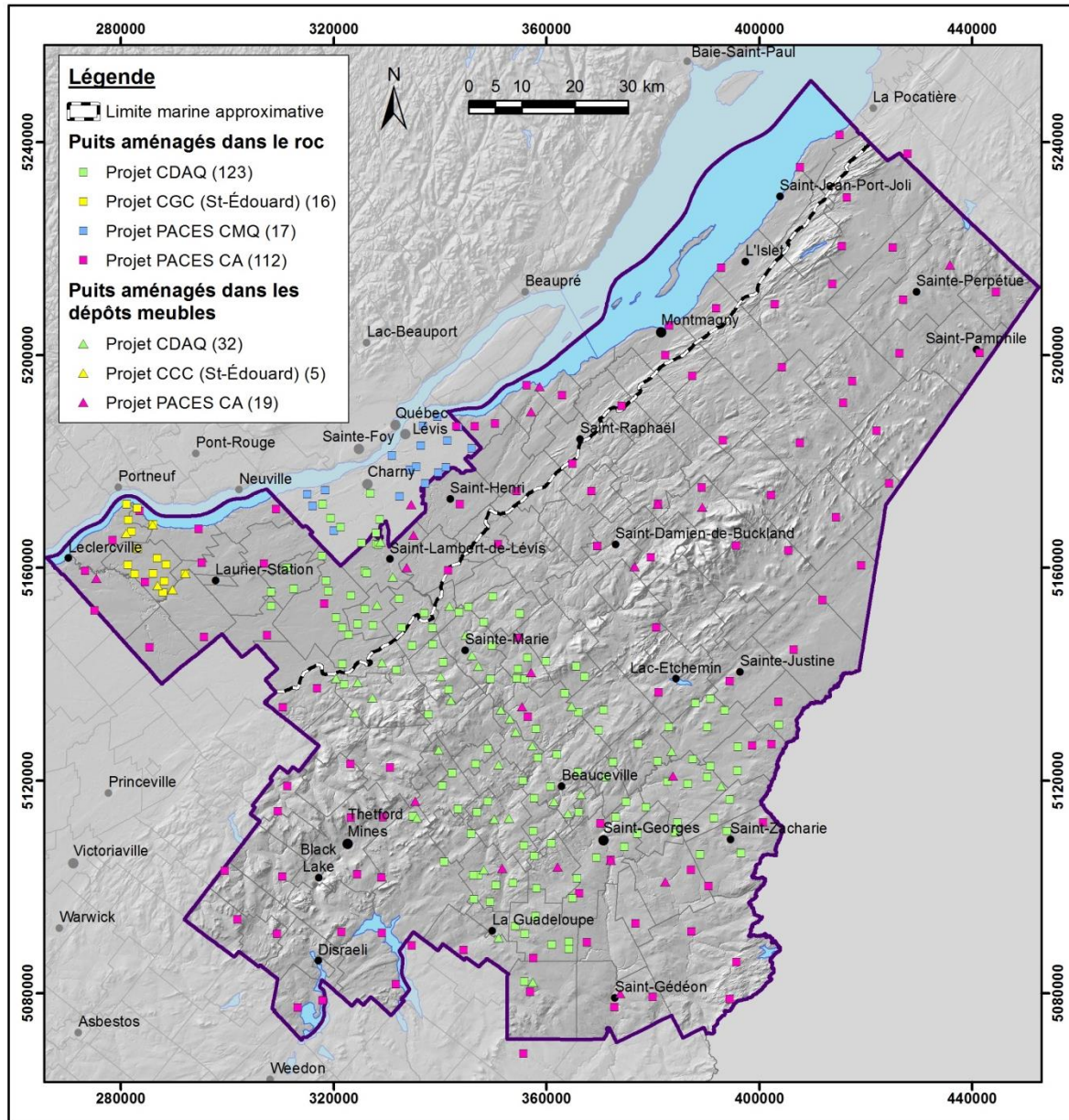


Figure 14 : Localisation des échantillons selon les types de puits

En plus des nouveaux échantillons prélevés spécifiquement dans le cadre du projet, des données géochimiques ont aussi été compilées provenant d'autres projets réalisés dans la région d'étude : 1) projet CDAQ réalisé en Basse-Chaudière et Moyenne-Chaudière (Tecsult, 2008); 2) analyses isotopiques réalisées par la CGC dans la Basse-Chaudière et la Moyenne-

Chaudière pour compléter les analyses chimiques acquises dans le cadre du projet CDAQ (Benoit et al., 2009); 3) analyses faites dans le secteur de Lévis dans le cadre du projet PACES de la CMQ réalisé par l'Université Laval; et 4) analyses chimiques faites dans la région de Saint-Édouard-de-Lotbinière dans le cadre d'un projet réalisé par la CGC. En bref, 84 % des puits échantillonnés sont des puits ouverts au roc, le reste correspondant à des puits munis d'une crépine ou de puits-citernes aménagés dans des aquifères granulaires. Les résultats géochimiques sont en cours d'interprétation avec des méthodes statistiques multivariées et graphiques.

## 4.6 Levés de sismique réflexion

### Objectif

L'objectif des travaux de sismique réflexion est de représenter les variations latérales de la géologie à l'endroit d'anciens paléochenaux présumés des rivières Chaudière et Etchemin situés près de Saint-Henri. Selon les données de forage existantes, la profondeur d'investigation visée par les travaux doit être d'environ une centaine de mètres de profondeur.

### Méthodologie

Les levés de sismique réflexion ont pour objectif de fournir de l'information sur les structures internes des dépôts meubles ainsi que de caractériser l'interface entre ces dépôts et le roc fracturé ou le till sous-jacent. Par ailleurs, le traitement avancé des données de sismique réflexion permet de définir des images de vitesses sismiques des ondes P,  $S_v$  et  $S_h$ , paramètres permettant notamment de différencier les argiles des sables. Le principe d'un levé sismique réflexion consiste à émettre des ondes acoustiques de différentes fréquences et à enregistrer les signaux réfléchis, transmis ou réfractés à l'aide de capteurs (géophones) déposés sur le sol. Les levés terrain et le traitement des données sismiques ont été réalisés par la compagnie MBMS Solutions Inc. L'équipement utilisé comprend une source multidirectionnelle portable, tractée à partir d'un camion, sur lesquelles sont fixées des unités de géophones à trois composantes, deux horizontales et une verticale. La source vibrante utilisée pour l'acquisition permet de produire des ondes de cisaillement parallèles et transverses ( $S_v$  et  $S_h$ ), ainsi que des ondes de compression (P). La source balaye une plage de fréquences entre 20 et 500 Hz. Les points de tir sont espacés d'environ 3 m. Le système d'enregistrement comporte 48 géophones (figure 15) qui échantillonnent le signal selon les 3 composantes (vertical, parallèle et transverse).

### Description des travaux

Des levés de sismique réflexion ont été réalisés au cours du mois d'octobre par la firme MBMS Solutions Inc. dans le secteur de Saint-Henri. Trois profils distincts ont été réalisés dans le même secteur, totalisant près de 5 km de levés (figure 16). Les résultats sont en cours d'interprétation et serviront notamment à réaliser des coupes stratigraphiques. La figure 17 présente un profil préliminaire de l'interprétation des réflecteurs en fonction de la profondeur.

Les résultats préliminaires indiquent que des travaux complémentaires seront requis pour investiguer davantage le secteur, de même que pour valider l'interprétation préliminaire des levés sismiques. Des sondages CPT et/ou RPSS sont donc prévus à l'été 2014 le long des levés sismiques. Le secteur avec l'épaisseur présumée la plus importante constitue une cible potentielle pour un éventuel forage conventionnel ou un forage rotonsonic qui permettrait l'échantillonnage en continu et la description de la totalité de la séquence quaternaire jusqu'au roc.



Figure 15 : Photo des capteurs à trois composantes des ondes sismiques

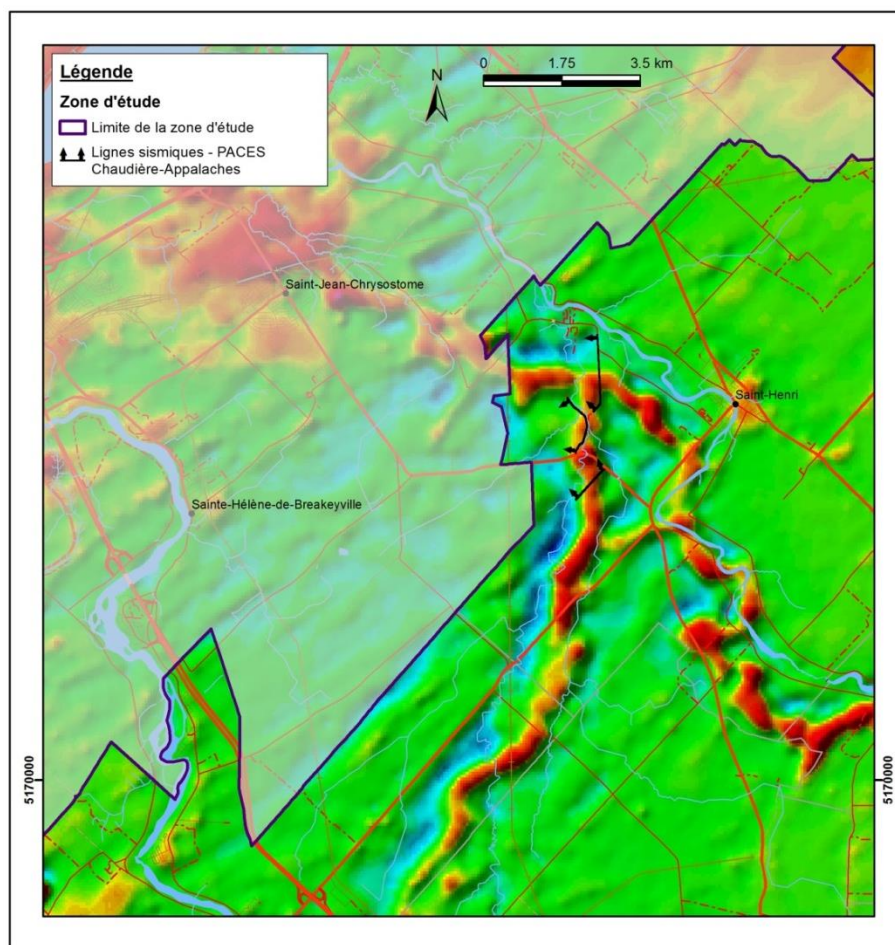


Figure 16 : Localisation des levés sismiques de l'automne 2013 avec, en arrière-plan, la dérivée première du levé aéromagnétique régional

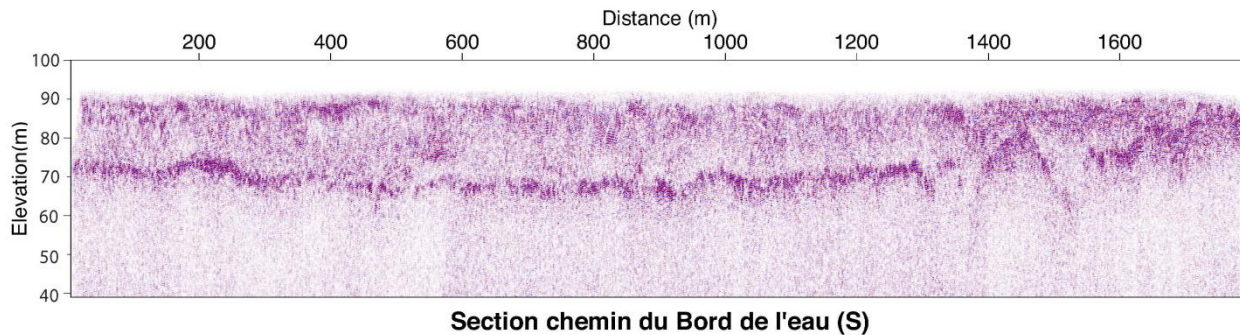


Figure 17 : Exemple d'un profil de réflexion sismique

## 4.7 Travaux de terrain complémentaires prévus en 2014

### 4.7.1 Sondages et forages

Quelques sondages complémentaires, CPT et RPSS, sont prévus au début de l'été 2014, principalement le long des levés sismiques afin de valider les profils d'interprétation. Il est aussi possible que d'autres forages complémentaires soient réalisés dans le même secteur afin de compléter l'investigation sur la présence possible d'un aquifère granulaire à l'endroit des paléochenaux. Enfin, un forage conventionnel ou de type Rotosonic pourrait aussi être réalisé afin d'échantillonner toute la séquence de sédiments présents dans ce secteur et ainsi valider la nature et l'origine des dépôts.

### 4.7.2 Levés électriques avec imagerie bidimensionnelle

Des levés électriques pourraient également être réalisés à l'été 2014 afin d'aider à définir les contextes hydrostratigraphiques du secteur de Saint-Henri dans le secteur des paléochenaux des rivières Etchemin et Chaudière. Les levés seraient réalisés avec le système SYSCAL Pro (IRIS instrument) de l'INRS comprenant 96 électrodes espacées de 5 m. Les profils de résistivité électrique sont effectués en mesurant la différence de potentiel à l'aide d'électrodes (tiges de métal) qui sont enfoncées dans le sol et par lesquels on injecte un courant d'intensité connue. De façon séquentielle, un courant est appliqué dans deux d'entre elles et le reste des électrodes mesure les différences de potentiel électrique. Ces mesures de potentiel électrique sont interprétées en profils bidimensionnels de résistivité électrique qui donne une image des contrastes des différents matériaux en place.

### 4.7.3 Diagraphies

Des diagraphies sont aussi prévues à l'été 2014 dans certains puits conventionnels, surtout dans la région des basses-terres près du fleuve Saint-Laurent, dans le nord-ouest de la zone d'étude. L'objectif de ces diagraphies est d'acquérir des données sur les caractéristiques hydrauliques du puits et sur le réseau de fractures. Les sondes utilisées permettent de mesurer le diamètre du puits (*caliper*), la radioactivité naturelle (*natural gamma*), la résistivité normale et la propagation acoustique (*full waveform sonic*) du milieu, la température et la résistivité du fluide dans le puits, la fracturation perceptible aux parois (par *acoustic televiewer*) et les débits des fractures perméables (par débitmètre). Les profils verticaux obtenus permettent ainsi de distinguer les lithologies locales tout en estimant certaines de leurs propriétés (ex. porosité, paramètres élastiques, densité et patrons de fracturation) et ils servent également dans la construction et l'ajustement vertical du modèle géologique de la région. Les renseignements

obtenus sur la fracturation du roc seraient utilisés pour améliorer la compréhension de l'écoulement à l'échelle régionale.

## **5 INTÉGRATION DES DONNÉES COLLECTÉES**

### **5.1 Description de la base de données à référence spatiale**

Une description sommaire des caractéristiques de la base de données (BD) du projet est présentée ci-dessous mais une version plus détaillée est présentée dans le rapport de la phase 1 du projet Chaudière-Appalaches. Les différentes composantes de la base de données sont gérées à l'aide du système de gestion de base de données relationnelle PostgreSQL, qui permet de garder un lien dynamique entre les données et l'utilisateur. Cette fonctionnalité est un atout pour les applications cartographiques dans les systèmes d'information géographiques (SIG) tels ArcGIS pour lesquelles un lien direct avec la base de données peut être créé. La gestion des données par PostgreSQL permet aussi à de multiples usagers d'avoir accès simultanément aux formulaires de la base de données « terrain » et ce autant via un réseau local qu'à distance via internet.

La figure 18 présente des extraits du formulaire de saisie utilisé pour entrer la localisation d'un objet (ex. : puits, forage, sondage, affleurement, point de départ d'un levé géophysique), tandis que la figure 19 illustre le formulaire de saisie des observations (ex. : échantillonnage d'eau ou de sol, niveau d'eau, stratigraphie, mesures in situ géochimiques, données d'essais de pompage) liées à cet objet.

### **5.2 Bilan de l'intégration des données dans la base de données du projet**

La cueillette des données existantes a été décrite en majeure partie dans le rapport de la phase 1 du projet. Cette collecte s'est poursuivie lors de la deuxième année du projet lors de laquelle plusieurs données de qualité nous ont été transmises par les différents partenaires via les OBV-CA, principalement sous de forme de rapports. Le tableau 3 résume les données existantes collectées lors de la première et de la deuxième année du projet et présentement intégrées à la base de données pour la zone d'étude.

Montérégie  
paces.ete.inrs.ca/monteregie/update\_locPage.php

Localisation pour laquelle vous entrez ou éditez des données

loc_id	x	y	Description
loc_mont2000	674349	5058540	La localisation provient du SIH et elle est en UTM nad 83

Données de localisation correspondant à l'identifiant entré  
--VOUS TRAVAILLEZ AVEC LA BD MONTEREGIE--

\*# Localisation: loc\_mont2000

Municipalité: Saint-Liboire

Carte NTS: [ ]

Projection: UTM NAD 83

\*Zone UTM(): 18

\*X(d): 674349

\*Y(d): 5058540

Source Loc.: Base de données

Note 500 c. max.: La localisation provient du SIH et elle est en UTM nad 83

Altitude

Altitude(d): 81.3419494628906

Source Alt.: Non-applicable

Note sur la localisation 500 c. max.: cle provenant de la fusion des colonnes cle\_puits no\_projets cle\_puits1 du aih 197810017805

Retour Page d'accueil

Figure 18 : Exemple de formulaire de saisie pour la localisation d'un objet

Montérégie  
paces.ete.inrs.ca/monteregie/insert\_observPage.php

Localisation pour laquelle vous entrez ou éditez des données

loc_id	x	y	Description
loc_mont2000	674349	5058540	La localisation provient du SIH et elle est en UTM nad 83

Objet et observation(s) associé(s)  
--VOUS TRAVAILLEZ AVEC LA BD MONTEREGIE--

\*Objet observé: AFFL - Affleurement

\*Date insertion objet: 2010/08/17

Note sur l'objet: [ ]

# Observation: Le numéro d'observation est généré automatiquement 103317

\*Nom: Christine Rivard

\*Date observation(s): 2010/08/17

\*Observation(s) Intérêt(s) sur les formulaires: [ ]

Environnement: Tourbière

Précipitation: Non déterminée

Météo: Non déterminée

Note sur l'observation: [ ]

Retour Page d'accueil

Figure 19 : Exemple de formulaire de saisie pour les observations liées à un objet

Le tableau 3 n'inclut pas les données obtenues de la Banque de données géochimiques du Québec du MRN pour laquelle 8 191 points d'échantillonnage d'eau souterraine sont disponibles. Ces données ont été exclues du bilan puisqu'elles sont potentiellement des doublons des données provenant du SIH. Des vérifications supplémentaires sont donc nécessaires avant de pouvoir utiliser ces données pour la préparation des livrables du projet PACES.

Tableau 3 : Bilan des données acquises et intégrées à la base de données

Description de la source des données	Organisme(s)	Nombre de forages/puits
Système d'information hydrogéologique	MDDEFP	17 052
Documents d'archives gouvernementales	MDDEFP	142
Système d'information géominière (SIGEOM)	MRN	1 945
Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG)	MRN	33
Données de forages géothermiques de la Coalition canadienne pour l'énergie géothermique	CCEG	100
Base de données géotechniques	MTQ	46
Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ)	MDDEFP	20
Données issues des travaux de terrain du projet PACES en Chaudières-Appalaches	INRS	64
Documents obtenus auprès de municipalités ou des partenaires du projet PACES en Chaudière-Appalaches	Municipalités et partenaires	526
	<b>Total</b>	<b>19 928</b>

Pour chaque source de données indiquée au tableau 3, les différents types d'information disponibles (ex. : analyses géochimiques, échantillons de sol, niveaux d'eau, stratigraphie, essais de pompage, ...) ont également été intégrés à la base de données, à l'exception des données issues des travaux de terrain du projet PACES Chaudière-Appalaches puisqu'elles sont en cours d'interprétation. Par ailleurs, certaines données des projets PACES antérieurs, notamment ceux des régions de Bécancour et de la Communauté métropolitaine de Québec, sont également en cours d'intégration à la base de données afin d'assurer, dans la mesure du possible, une cohérence avec les produits livrables de ces projets aux endroits où les zones d'études se chevauchent ou se rejoignent.

### 5.3 Validation des données collectées

Bien que plusieurs étapes de validation aient été effectuées lors de la collecte des données existantes et des données de terrain, l'exercice principal de validation des données sera réalisé dans les prochains mois suite à l'intégration de toutes les données. Un protocole de vérification de la fiabilité et de validation des forages développé par l'UQAC et adapté par l'INRS pour les

besoins du projet servira de base pour développer les fonctions de validation utilisées par le moteur de base de données PostgreSQL. Certains types de validation spatiale (ex. : localisation des forages vis-à-vis des plans d'eau) seront également réalisés dans un système d'information géographique. Les fonctions de validation des données permettront notamment d'évaluer la fiabilité et la précision des données compilées et d'identifier les doublons et les données aberrantes parmi les différentes informations collectées.

## **6 CONCLUSION**

L'année 2013-2014 a été principalement dédiée à la réalisation d'une campagne de caractérisation hydrogéologique sur le territoire de la région d'étude. Ces travaux se sont déroulés sur le terrain sur sept mois, soit de mai à novembre 2013. En plus des travaux de terrain, des efforts significatifs ont été dédiés à l'extraction et la compilation des données ainsi qu'à l'intégration de données à la base de données. La prochaine année permettra de compléter les données de terrain et interpréter celles acquises.



## 7 RÉFÉRENCES

- Benoit, N., Nastev, M., Blanchette and D., Roy, N. (2009) Hydrogéochimie du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec. 10th Joint CGS/IAH-CNC Conference, Halifax, 8 p.
- Bolduc, A.M. (2003) Géologie des formations superficielles, Charny, Québec. Commission géologique du Canada, Dossier public 1776, échelle, 1 : 50 000.
- Caron, O. (2013) Synthèse et modèle cartographique 3D des formations quaternaires pour les bassins versants des rivières Chaudière et Saint-François : Géochronologie, stratigraphie et paléogéographie Wisconsinienne du sud du Québec. Thèse de doctorat, UQAM, 390 p.
- Dubé, J.C. (1971). Géologie des dépôts meubles, région de Lyster : comtés de Mégantic, Lotbinière, Nicolet et Arthabaska. Ministère des Richesses Naturelles, Québec, Service de l'exploration géologique, RP-596. 12 p., carte-1732 à l'échelle 1 : 63 360.
- Fellenius, B.H., Eslami, A. (2000) Soil profile interpreted from CPTu data. In: Year 2000 Geotechnics. Geotechnical Engineering Conference, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, November 27–30, 18pp.
- Gaucher, E. et al. (1984) Compilation de la géologie du Quaternaire - Région des Appalaches. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, Rapport DV 84-10, 89 cartes à 1 : 50 000
- Lunne, T., P.K. Robertson and J.J.M. Powell (1997) Cone penetration testing in geotechnical practice. Spon Press, Taylor and Francis Group, New York, 312 p.
- Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec (MAMROT) (2013) Décret de population pour l'année 2012. Gouvernement du Québec, MAMROT, URL : [www.mamrot.gouv.qc.ca/organisation-municipale/decret-de-population](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/organisation-municipale/decret-de-population).
- Tecsult (2008) Cartographie hydrogéologique du bassin versant de la rivière Chaudière - Secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière. Étude réalisée dans le cadre du Projet eaux souterraines de la Chaudière, financé par le Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec (PAECQ) et géré par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ), 142p.



**Annexe 1 :**  
**Exemple de questionnaire pour l'utilisation de l'eau**

---

**Annexe 2 :**  
**Journaux de forage et détails d'aménagement des puits**

**Annexe 3 :**  
**Cahiers des observations de terrain**

---

**Annexe 4 :**  
**Protocole d'échantillonnage de l'eau souterraine**

---

**Annexe 5 :**  
**Liste des analyses réalisées sur les échantillons d'eau**  
**souterraine**

---