

# **NOTIONS D'HYDROGÉOLOGIE**

*Les eaux souterraines pour tous*

*Par : Miryane Ferlatte, Yohann Tremblay, Alain Rouleau, Ursula F. Larouche*

---



Ce document est rendu possible grâce au financement accordé par le programme *Appui aux Réseaux d'innovation* par les Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT). Il est le résultat du travail du Comité de vulgarisation du Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES), constitué des membres suivants :

- Miryane Ferlatte, coordonnatrice scientifique, RQES
- Yohann Tremblay, agent de transfert, RQES
- Alain Rouleau, professeur-chercheur à l'Université du Québec à Chicoutimi - UQAC
- Ursula F. Larouche, Conseillère en développement des ressources naturelles, CRÉ Saguenay-Lac-Saint-Jean

Avec la participation de Michelle Laithier, de l'UQAM, pour le graphisme des figures.



## Référence à citer

Toute utilisation des notions et figures doit être citée comme suit :

Ferlatte, M., Tremblay, Y., Rouleau, A. et Larouche, U. F. 2014. *Notions d'hydrogéologie - Les eaux souterraines pour tous*. Première Édition. Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES). 63 p.

*La plupart des photographies reproduites dans ce document appartiennent aux équipes de réalisation des PACES ou au Réseau québécois sur les eaux souterraines. Lorsque ce n'est pas le cas, le crédit photographique (source) est indiqué sur l'image.*

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>Table des matières .....</b>	<b>2</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>4</b>
<b>À propos: Le Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Introduction à l'hydrogéologie .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Géologie du socle rocheux .....</b>	<b>8</b>
Histoire géologique.....	8
Socle rocheux et eau souterraine .....	9
Les différents types de roches .....	10
<b>3. Géologie du Quaternaire .....</b>	<b>12</b>
La glaciation .....	12
La déglaciation .....	13
Les dépôts meubles .....	14
Les principaux types de dépôts meubles .....	16
<b>4. Contextes hydrogéologiques .....</b>	<b>22</b>
Séquences hydrostratigraphiques .....	22
Conditions de confinement .....	24
<b>5. Les eaux souterraines .....</b>	<b>26</b>
Cycle de l'eau, bassin versant et bilan hydrique .....	26
Écoulement de l'eau souterraine .....	30
Piézométrie .....	31
Recharge et résurgence .....	32

<b>6. Quantité.....</b>	<b>33</b>
Propriétés hydrauliques .....	33
Pompage et puits.....	35
Rendement potentiel des aquifères .....	37
<b>7. Qualité de l'eau souterraine.....</b>	<b>38</b>
Géochimie de l'eau souterraine .....	38
Critères de qualité de l'eau .....	40
<b>8. Vulnérabilité.....</b>	<b>44</b>
Contamination .....	44
L'indice DRASTIC.....	45
Activités potentiellement polluantes.....	47
<b>9. Gestion de la ressource .....</b>	<b>49</b>
Gestion durable des eaux souterraines .....	49
Les indicateurs .....	52
Usages et pressions .....	55
Législation et gouvernance.....	58
<b>10. Synthèse .....</b>	<b>59</b>
<b>11. Bibliographie .....</b>	<b>60</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Définitions principales.....	7
Figure 2. Chronologie des évènements .....	9
Figure 3. Aquifère au roc fracturé .....	10
Figure 4. Provinces géologiques du Québec .....	11
Figure 5. Extension de la calotte glaciaire .....	12
Figure 6. Extension maximale de la Mer de Champlain .....	13
Figure 7. Formes glaciaires et fluvioglaciaires .....	14
Figure 8. Aquifère granulaire .....	15
Figure 9. Exemples de contextes hydrostratigraphiques.....	23
Figure 10. Exemple de colonne stratigraphique simplifiée (Cloutier et coll., 2013).....	24
Figure 11. Confinement des aquifères.....	25
Figure 12. Le cycle hydrologique.....	26
Figure 13. Eau disponible.....	27
Figure 14. Bassin versant et sous-bassin .....	28
Figure 15. Bilan hydrique.....	29
Figure 16. Écoulements souterrains, zones de recharge et de résurgence.....	30
Figure 17. Puits jaillissant et puits de surface .....	31
Figure 18. Piézométrie .....	32
Figure 19. Gradient de charge hydraulique.....	34
Figure 20. Cône de rabattement et rayon d'influence .....	36
Figure 21. Évolution géochimique des eaux souterraines.....	39
Figure 22. DRASTIC .....	46
Figure 23. Objectifs de gestion durable .....	50
Figure 24. Connaissances scientifiques nécessaires pour une gestion durable des eaux souterraines.....	51
Figure 25. Consommation en eau souterraine par secteur .....	56
Figure 26. Synthèse .....	59

## À PROPOS: LE PROGRAMME D'ACQUISITION DE CONNAISSANCES SUR LES EAUX SOUTERRAINES (PACES)

En réponse aux sollicitations croissantes concernant l'approvisionnement en eau souterraine pour la population, l'agriculture et l'industrie au Québec, le Gouvernement du Québec a accéléré depuis 2008 le rythme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines, pour être en mesure de mieux protéger la ressource et d'assurer sa pérennité. Ceci a été fait notamment par l'adoption de la Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection, par la mise sur pied du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) et par le développement du Portail de l'eau (MDDELCC 2012). Grâce au PACES, le Québec se dote d'une couverture régionale de connaissances hydrogéologiques de grande qualité. Il faut toutefois s'assurer que ces connaissances acquises soient transférées afin d'outiller les gestionnaires du territoire et leur permettre de prendre les mesures adaptées pour la gestion durable de la ressource en eau souterraine.

Le document « **Notions d'hydrogéologie - Les eaux souterraines pour tous** » décrit les notions clés d'hydrogéologie essentielles à la compréhension des données issues du PACES, dans le but de bien arrimer ces données aux besoins en connaissances des divers intervenants impliqués dans l'utilisation et la gestion des eaux souterraines; ceci assurera une mise en valeur et un transfert efficace des résultats des recherches. En d'autres termes, l'objectif est de faire en sorte que les intervenants acquièrent un vocabulaire de base pour exprimer leurs besoins et leurs questions devant un hydrogéologue. Le défi du transfert de connaissances consiste donc à rendre compréhensible et exploitable des données techniques et scientifiques sur les eaux souterraines, depuis l'acquisition de connaissances par les universitaires jusqu'à l'utilisation des informations par les acteurs de l'eau et gestionnaires du territoire. Les descriptions des notions clés qui sont présentées ici constituent donc un premier pas vers cet objectif.

## 1. INTRODUCTION À L'HYDROGÉOLOGIE

---

L'hydrogéologie est une discipline scientifique qui recoupe l'hydrologie et la géologie. Il en résulte deux approches différentes mais complémentaires permettant de définir l'hydrogéologie:

- Une spécialisation de la géologie qui traite des propriétés des milieux portant notamment sur leur capacité à contenir et à laisser s'écouler l'eau souterraine. L'hydrogéologie est donc dans ce cas une discipline axée sur les milieux géologiques que l'on considère comme le **CONTENANT** des eaux souterraines.
- Une spécialisation de l'hydrologie qui traite de l'eau souterraine en tenant compte des conditions géologiques. L'hydrogéologie est donc dans ce cas une discipline axée sur les comportements de l'eau souterraine, que l'on considère comme le **CONTENU** des milieux géologiques aquifères.

Un aquifère correspond à une formation géologique qui permet l'écoulement d'une quantité d'eau suffisante pour une exploitation utile. Deux types de milieux géologiques contiennent des aquifères :

- le roc fracturé qui constitue la croûte terrestre. On parle alors d'**aquifère de roc fracturé**.
- les dépôts meubles qui sont l'ensemble des sédiments qui proviennent de l'érosion du socle rocheux et qui le recouvrent. On parle alors d'**aquifère granulaire**, lorsque les sédiments sont suffisamment perméables.

Ces milieux sont définis par leurs propriétés intrinsèques dont les plus importantes sont la **porosité** et la **conductivité hydraulique**. La porosité est constituée des interstices formés par des fractures du roc ou des espaces vides entre les grains des dépôts meubles. Plus la porosité du milieu est élevée, plus il y a d'espace disponible pour emmagasiner de l'eau. La conductivité hydraulique est l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par l'eau. Plus la conductivité hydraulique du milieu est élevée, plus il est perméable, et plus l'eau peut y pénétrer et circuler facilement.

Ces propriétés définissent le caractère aquifère ou aquitard du milieu (Figure 1). L'aquifère est le nom donné à une formation géologique saturée en eau et suffisamment perméable pour permettre son pompage. À l'inverse, un aquitard, bien qu'il puisse être saturé d'eau, n'est pas suffisamment perméable pour qu'il soit possible d'y extraire l'eau (ex: argile, shale, schiste). Il agit comme barrière naturelle à l'écoulement pouvant isoler un aquifère de la surface, contribuant ainsi à protéger ce dernier des contaminants venant de la surface.

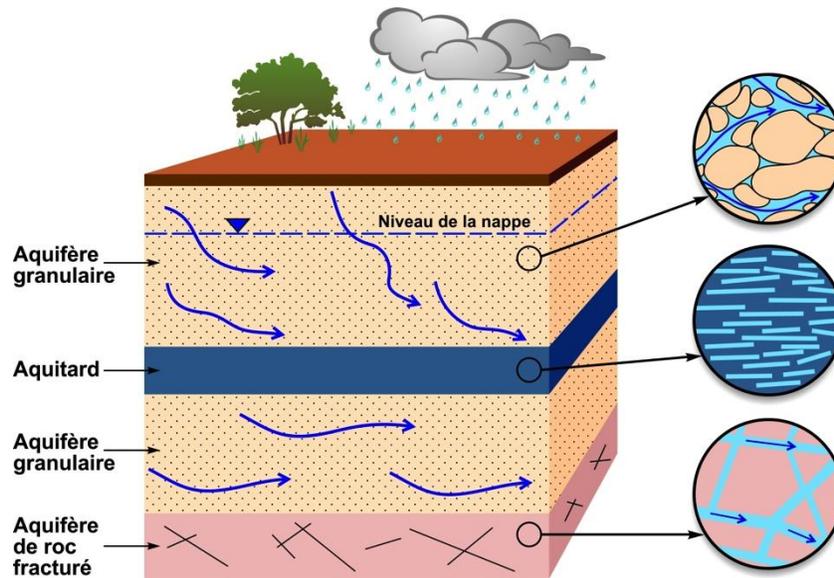


Figure 1. Définitions principales

Pour bien distinguer la différence entre aquifère et **nappe phréatique**, il est essentiel de comprendre que l'aquifère représente le contenant dans lequel l'eau circule tandis que la nappe représente l'eau qui circule dans l'aquifère, soit le contenu. L'**eau souterraine** est l'eau qui se trouve sous la surface du sol et qui remplit les interstices du milieu géologique. On en retrouve partout sous nos pieds!

### MÉTHODES UTILISÉES EN HYDROGÉOLOGIE

*La première étape de toute étude hydrogéologique consiste à effectuer la synthèse des données existantes. Ainsi les données de forages, puits et piézomètres ont d'abord été compilées et intégrées dans un système d'information géographique. Des travaux sur le terrain ont ensuite été réalisés afin de combler les lacunes observées dans les connaissances régionales sur les eaux souterraines.*

*Les sablières, les rives des cours d'eau et les bords de route sont des endroits privilégiés pour étudier les dépôts de surface, puisque ceux-ci y ont été érodés ou excavés. Les forages permettent d'analyser en détail les différentes unités géologiques, d'échantillonner des carottes de sédiments et d'installer des puits d'observation.*

*Les méthodes géophysiques, telle que les relevés de résistivité électrique, permettent d'explorer le sous-sol sans procéder à des forages. Ces relevés permettent de mesurer les variations des propriétés électriques du sol afin d'identifier les différentes unités géologiques présentes. La sismique-réflexion haute-résolution est une autre méthode géophysique qui permet d'obtenir des relevés qui représentent, en quelque sorte, une radiographie du sous-sol. Un camion vibreur émet des ondes qui sont réfléchies par les différentes unités géologiques puis interceptées par des géophones.*

*L'eau souterraine provenant des puits d'observation, des puits municipaux et des puits domestiques peut être échantillonnée afin d'en mesurer la qualité. De plus, des mesures de niveau d'eau et des essais de pompage permettent d'évaluer le niveau régional de la nappe et les propriétés hydrauliques du sous-sol.*

Source : PACES – Mauricie (Leblanc et coll. 2013)

## **2. GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX**

---

### **HISTOIRE GEOLOGIQUE**

La disponibilité de l'eau souterraine dépend de la géologie du milieu, plus particulièrement des propriétés des différents matériaux géologiques dans lesquels l'eau circule, qu'il s'agisse de roc ou de sédiments meubles.

La compréhension de l'histoire géologique d'une région permet de connaître la nature et la disposition des différents matériaux géologiques qui s'y retrouvent. Ces informations sont incontournables pour comprendre l'écoulement de l'eau souterraine et elles constituent de bons indices pour localiser les meilleurs aquifères.

La figure 2 décrit les principaux évènements géologiques qui se sont produits au Québec (se lit de bas en haut).

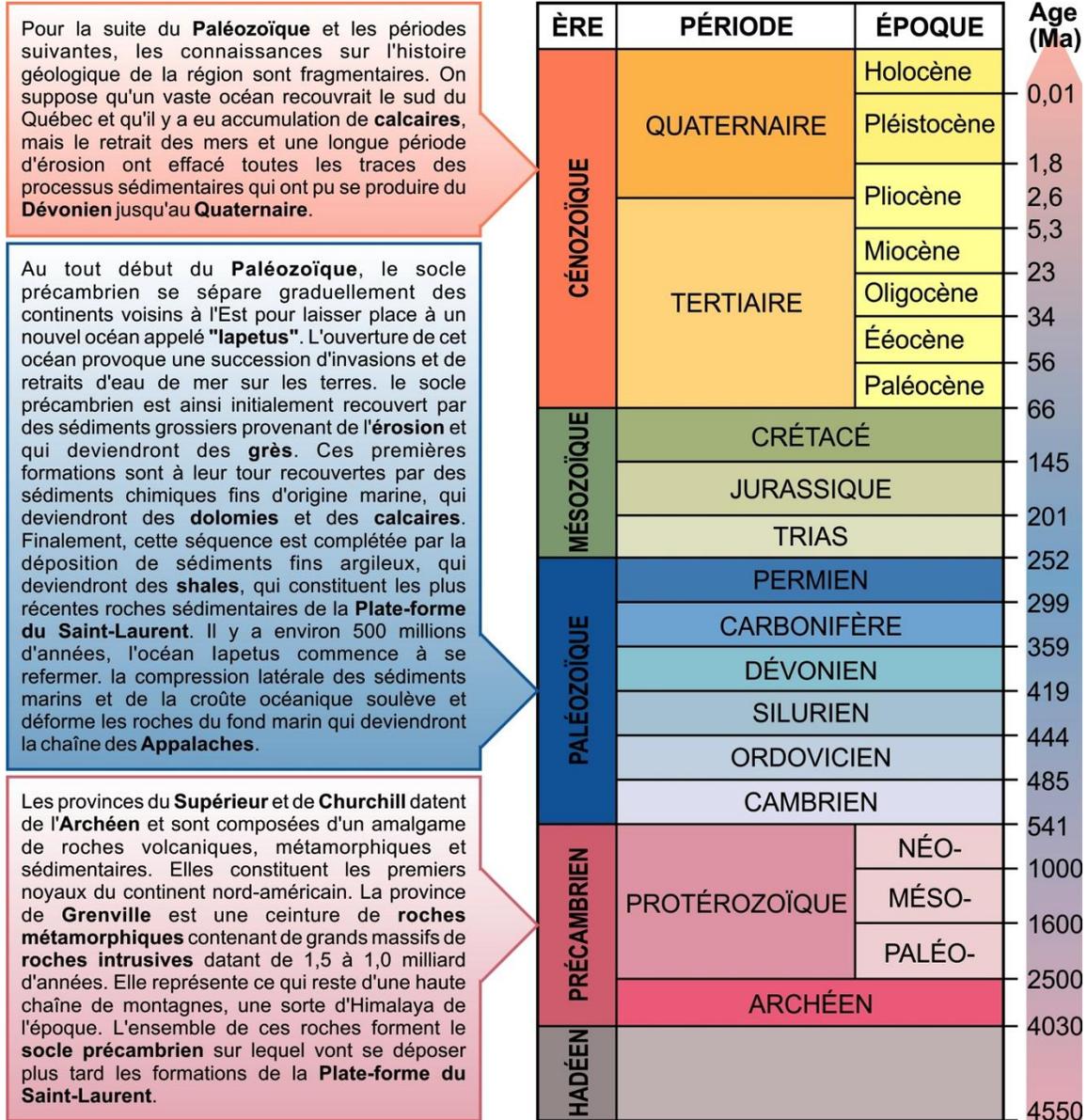
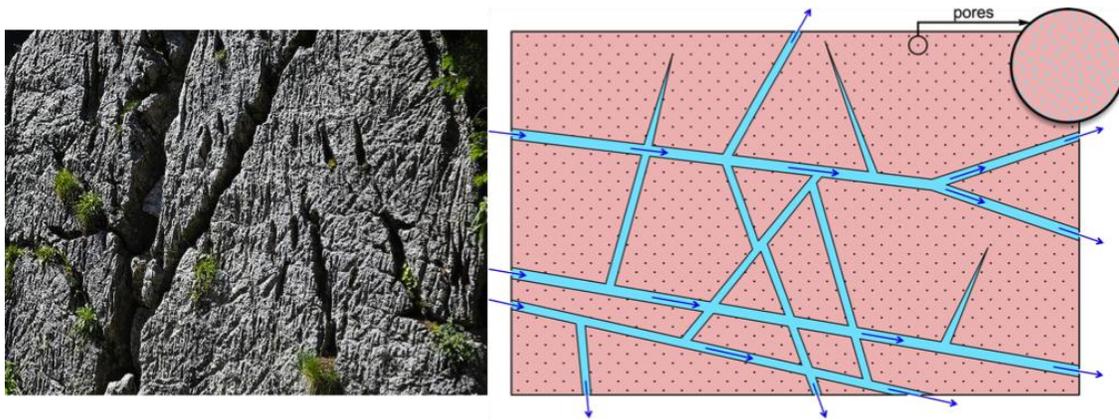


Figure 2. Chronologie des évènements

### SOCLE ROCHEUX ET EAU SOUTERRAINE

Lorsque les roches sont suffisamment fracturées, elles constituent un **aquifère** et des puits peuvent y être aménagés pour exploiter l'eau souterraine. La majorité de l'eau souterraine est contenu dans les **pores** de la roche, mais ceux-ci sont très peu connectés, ne permettant pas une circulation efficace de l'eau. Pour leur part, les **fractures** dans la roche contiennent moins d'eau mais permettent une circulation d'eau souterraine souvent suffisante pour le captage

(Figure 3). À titre d’analogie, on peut s’imaginer un stationnement de centre d’achat contenant de nombreuses voitures, mais où la circulation y est très lente. À l’opposé, la densité de voiture sur une autoroute est beaucoup plus faible, mais la circulation y est très rapide. En forant un puits dans la roche, il est donc souhaité de rencontrer le plus grand nombre de fractures (autoroute) possible afin d’extraire l’eau souterraine efficacement. L’aptitude de ces aquifères à libérer de l’eau dépend donc de l’ouverture des fractures et de l’interconnexion entre les diverses fractures qui constituent le réseau.



**Figure 3. Aquifère au roc fracturé**

Plusieurs types de roche que l’on retrouve au Québec présentent une fracturation variable et ne sont généralement pas assez perméables pour le pompage d’eau souterraine dédié à d’autres utilisations que domiciliaires. Les **roches sédimentaires** telles les grès et les calcaires peuvent toutefois faire exception.

### **LES DIFFERENTS TYPES DE ROCHES**

#### **Les roches métamorphiques**

Les roches métamorphiques du socle précambrien (provinces de Grenville, de Churchill et du Supérieur – Figure 4) sont les plus anciennes et sont principalement composées de **gneiss**, de **schistes**, de **quartzites** et de **roches volcaniques** métamorphisées, appelées des « **roches vertes** », retrouvées notamment en Abitibi. Plus récemment, la collision de plaques tectoniques et l’orogénèse des Appalaches ont aussi mené à la métamorphisation d’une portion des roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent. La perméabilité de ce type de roche est relativement faible, ce qui résulte en des aquifères peu productifs.

### Les roches ignées

Le socle précambrien contient des roches ignées **intrusives**, composées principalement de **granites**, d'**anorthosites**, de **syénites**, de **diorites** et de **gabbros**. Ces roches cristallines constituent généralement de piètres aquifères. Les **collines montérégiennes** sont également constituées de roches ignées intrusives. Ces dernières sont constituées d'intrusions de magma de la période du **Crétacé**, dans les couches sédimentaires de la Plate-forme du St-Laurent et des Appalaches, depuis mises à nu par l'érosion.

### Les roches sédimentaires

Les principales roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent sont les **grès**, les **dolomies**, les **calcaires** et les **shales**.

Ces type de roches peuvent constituer des aquifères plus perméables que les précédents. Les **grès** sont issus de l'agrégation et la cimentation de grains de **sable**. Ce sont des roches poreuses pouvant constituer de bons réservoirs d'eau souterraine, de gaz, ou de pétrole. Le **shale** est une roche sédimentaire à grain fin, formée par la compaction des **argiles** et des **silts**. Les **dolomies** et les **calcaires** sont formés de sédiments fins d'origine marine. Les **calcaires** sont très solubles dans l'eau, particulièrement lorsque celle-ci est acide. Cette propriété favorise le développement des réseaux de fractures propices à la circulation de l'eau, augmentant donc le potentiel aquifère de ces formations. Ultiment, de véritables tunnels souterrains (**karst**) peuvent ainsi être constitués mais ces conditions sont rares au Québec.

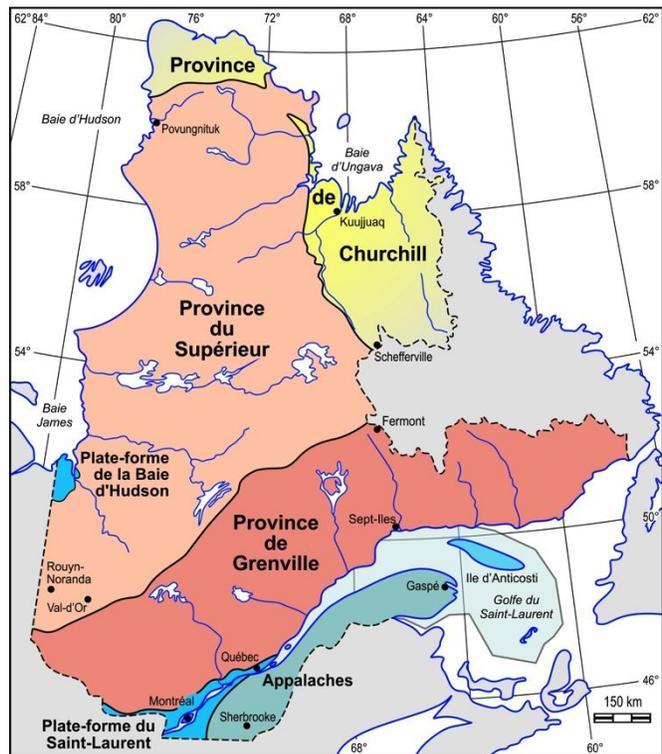


Figure 4. Provinces géologiques du Québec

Pour en savoir plus :

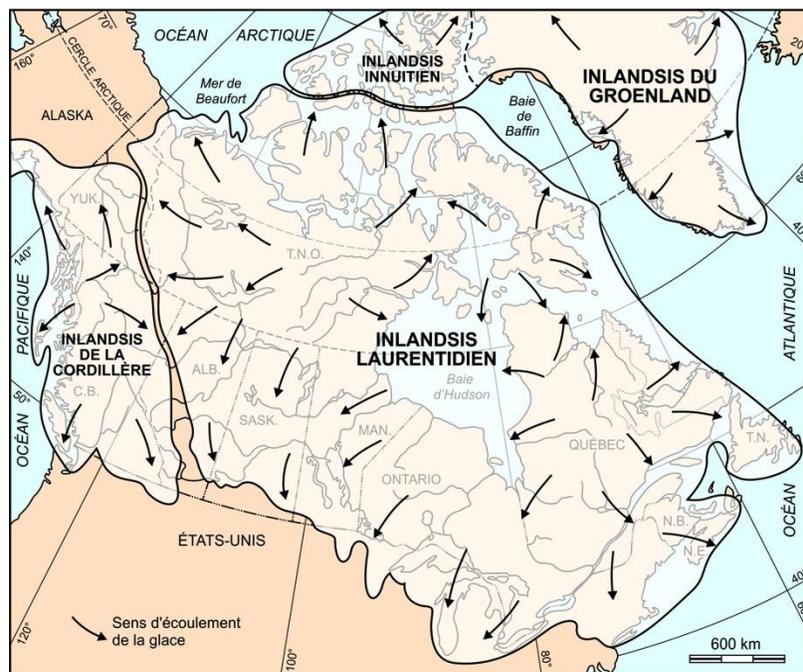
**Planète Terre – Le Québec géologique** (Bourque, P.-A. 1997-2004)

[En ligne : <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s5/plan.section.5.html>]

### 3. GEOLOGIE DU QUATERNAIRE

#### LA GLACIATION

Pendant la période du Quaternaire, de longues séquences de refroidissement ont favorisé la croissance de glaciers continentaux sur l'Amérique du Nord. Au cours de la dernière **glaciation**, il y a environ 21 000 ans, l'**inlandsis** Laurentidien recouvrait entièrement l'est du Canada jusqu'aux Rocheuses et une partie des États-Unis (Figure 5). Ce glacier avait une épaisseur pouvant atteindre 4 000 m en son centre, au voisinage de la Baie d'Hudson. Cette immense masse de glace a façonné le paysage par son action d'**érosion** et de **transport** de sédiments.

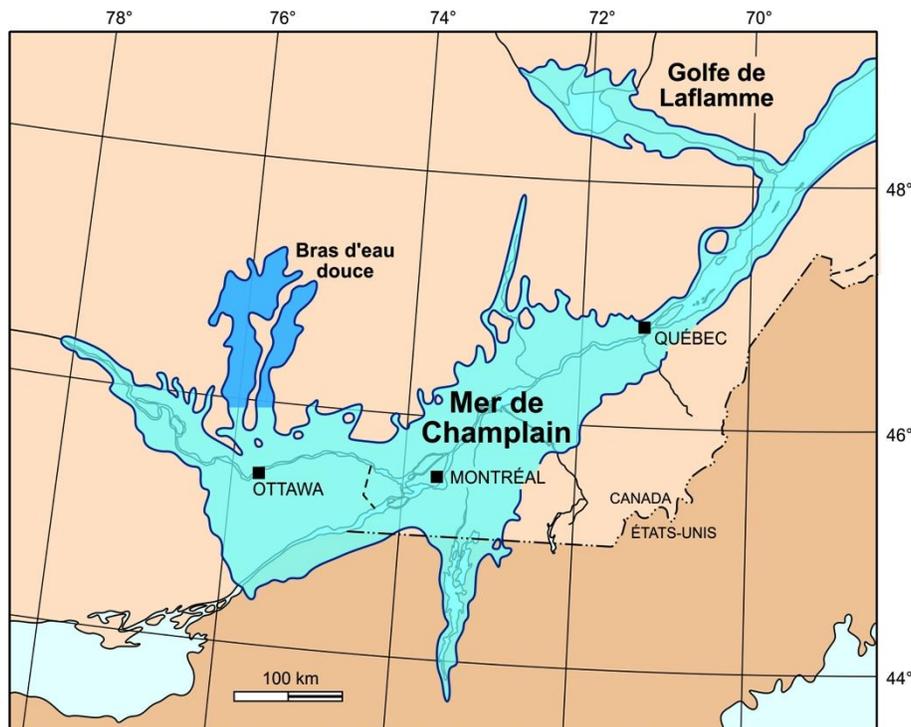


**Figure 5. Extension de la calotte glaciaire**

Les glaciers se déplaçaient sous l'effet de la gravité. Des débris de toutes tailles étaient incorporés à sa base, érodant la surface du sol, à la manière d'un papier sablé. D'autres fragments du socle rocheux étaient arrachés par l'action du gel et du dégel de l'eau sous le glacier. On distingue les **sédiments glaciaires**, déposés directement par la glace sur place ou aux marges du glacier (ex : **moraines, tills**), et les **sédiments fluvioglaciaires** redistribués par les eaux de fonte du glacier et déposés sur la plaine d'épandage (ex : **eskers, kames**).

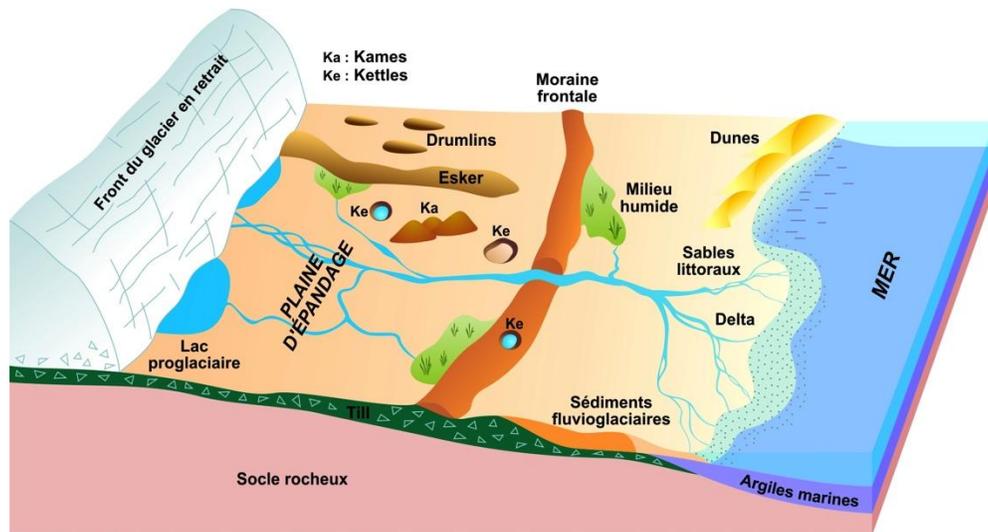
## LA DEGLACIATION

Les glaciers ont commencé à se retirer du Québec il y a environ 13 000 ans. Avec le poids gigantesque de la glace, la croûte terrestre s'est temporairement affaissée et la surface continentale s'est retrouvée par endroit sous le niveau de la mer. Lors de la fonte des glaciers, les Basses-Terres du Saint-Laurent, la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et les côtes de la Gaspésie et de la Côte-Nord ont ainsi été inondés, donnant naissance à la **mer de Champlain**, le **Golfe de Laflamme** (Figure 6) et la **mer de Goldthwait**. Ces dernières ont laissé derrière elles des dépôts marins d'eau profonde constitués d'**argiles**, ainsi que des sédiments littoraux constitués de **sables** fins. Ces sédiments ont recouvert les dépôts d'origine glaciaire. Ailleurs, les eaux de fonte se sont accumulées dans des **lacs proglaciaires** en marge des glaciers, comme le **lac Ojibway** en Abitibi-Témiscamingue. Ces lacs ont aussi laissé des argiles et des sables.



**Figure 6. Extension maximale de la Mer de Champlain**

Par la suite, les eaux de fonte du glacier ont redistribué ces matériaux sur la **plaine d'épandage**, façonnant différentes formes de **dépôts fluvioglaciaires** (Figure 7). En marge de ces plans d'eau, d'importants **deltas** se sont formés à l'embouchure des rivières charriant les eaux de fonte des glaciers, où des sédiments grossiers de type graveleux et sableux s'y sont accumulés.



**Figure 7. Formes glaciaires et fluvioglaciaires**

La croûte terrestre, libérée du poids de la glace, s'est ensuite mise à remonter, un phénomène appelé **relèvement isostatique**. Ce retour à l'équilibre s'accomplit depuis des milliers d'années et se poursuit encore aujourd'hui. Suite au relèvement isostatique, les invasions marines telles que la mer de Champlain se sont finalement vidées par le fleuve Saint-Laurent.

Pour en savoir plus :

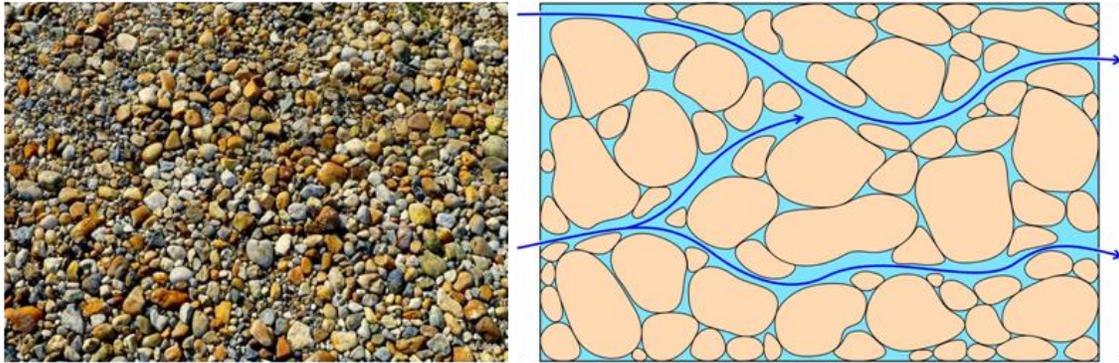
***Planète Terre – Le rabotage par les glaces*** (Bourque, P.-A. 1997-2004)

[En ligne : <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/glaces.html>]

### **LES DÉPÔTS MEUBLES**

Les dépôts meubles sont l'ensemble des sédiments qui recouvrent le socle rocheux. Ils proviennent généralement de l'érosion de la roche, mais aussi parfois de la matière organique ou des volcans. Les dépôts meubles possèdent généralement une **porosité** importante. Ils peuvent contenir entre 30 et 50% de leur volume en eau. L'aptitude de ces aquifères à laisser circuler l'eau dépend toutefois de la taille des pores et de leur interconnexion dans le matériau constituant les dépôts (Figure 8). Ainsi, plus les pores sont interconnectés, plus le milieu géologique est perméable et plus l'eau peut pénétrer et circuler facilement. La **granulométrie** des sédiments, c'est-à-dire la taille des grains, est importante en hydrogéologie car elle détermine la taille des pores. Plus les pores sont gros, plus ils sont interconnectés et plus

l'aquifère de dépôts meubles est **perméable**. Inversement, plus les pores sont petits, moins ils sont interconnectés et moins les sédiments sont perméables.



**Figure 8. Aquifère granulaire**

Les dépôts meubles sont souvent représentés sur une carte montrant la répartition spatiale des dépôts présents en surface (ex: carte de la géologie du Quaternaire). Ceci ne permet pas de visualiser comment sont organisés les sédiments en profondeur. L'agencement stratigraphique avec la profondeur peut être connu à partir des forages qui constituent pour l'hydrogéologue des fenêtres indispensables pour « voir » ce qui se retrouve sous terre.

### ***Épaisseur des dépôts meubles***

L'épaisseur et les propriétés des dépôts meubles qui recouvrent le roc influencent l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle régionale. Lorsque les dépôts meubles sont grossiers (sables et graviers) et que leur épaisseur est suffisamment importante, ils constituent un **aquifère granulaire** potentiellement exploitable. Cependant, si les dépôts meubles sont fins (argile et silt; les mots glaise et limon sont aussi utilisés) et suffisamment épais, ils forment plutôt un **aquitard**. Les informations sur l'épaisseur des dépôts meubles peuvent aussi s'avérer utiles dans d'autres domaines que l'hydrogéologie comme la construction d'infrastructures et le transport.

### ***Topographie du roc***

La topographie du roc sert à identifier les dépressions (creux, vallées enfouies) importantes du roc où ont pu s'accumuler une grande quantité de dépôts meubles, lesquels peuvent avoir un **potentiel aquifère** intéressant si ces sédiments sont grossiers (sables et graviers).

## LES PRINCIPAUX TYPES DE DEPOTS MEUBLES

### Les dépôts glaciaires

#### Till

Les tills forment un mélange de roches broyées dans une **matrice** fine et laissées en place lors du passage des glaciers. Ils résultent du transport par les glaciers de fragments arrachés au substrat rocheux et de dépôts meubles anciens. Ils sont constitués de grains de toutes tailles et sont communément peu perméables. Les tills dits « remaniés » font toutefois exception car les particules fines de leur matrice ont été lessivées par les eaux fluvio-glaciaires.



Tills



#### Moraine

Les moraines forment des crêtes de dépôts composés de till, de sédiments fluvio-glaciaires (sables, graviers, blocs) ou d'un mélange des deux. Elles sont le résultat de l'accumulation des matériaux érodés par le glacier à sa base (moraine de fond), à son front (moraine frontale), sur ses côtés (moraine latérale) ou dans des crevasses (moraine de De Geer). Par exemple, la moraine frontale de Saint-Narcisse, formée lors d'une réavancée glaciaire, a laissé en place une très grande quantité de dépôts qui forment une crête à proximité de la limite entre le Bouclier canadien et les Basses-Terres-du-Saint-Laurent. Les moraines peuvent être perméables aux endroits où les grains fins ont été transportés plus en aval par l'eau de fonte.



Sables, graviers, blocs fluvio-glaciaires

## Les dépôts fluvioglaciaires

### Esker

Un **esker** se présente en un cordon sinueux et allongé, constitué de sables et de graviers stratifiés et pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres de long. Les eskers résultent du dépôt des sédiments dans des tunnels sous-glaciaires creusés par l'évacuation des eaux de fonte du glacier. Ces matériaux ont généralement une grande perméabilité et un potentiel aquifère important, et constituent des zones favorables à la recharge mais plus vulnérables aux contaminations.

#### ***L'ESKER DE SAINT-MATHIEU-BERRY***

*L'esker de Saint-Mathieu/Berry s'est formé durant la fonte du dôme de glace de l'Hudson lors du retrait de l'Inlandsis Laurentidien, il y a 10 000 ans environ. Cet esker s'étend sur plus de 70 km et, par le fait même, constitue l'un des eskers les plus impressionnants d'Abitibi-Témiscamingue. L'eau qu'on y trouve est d'une très grande pureté. L'usine d'embouteillage Eaux Vives Water Inc qui produit l'eau Eska, de même que la ville d'Amos, puisent leur eau à même cet esker.*

Source : Portrait de l'esker aquifère Saint-Mathieu-Berry (SESAT 2013)



Esker, Abitibi-Témiscamingue (en haut : vue en coupe ; en bas : vue d'en haut)

### **Kames et kettles**

Les kettles sont des dépressions en cuvette laissées dans un dépôt glaciaire ou fluvioglaciaire. Ils résultent de l'effondrement des sédiments suite à la fonte d'un gros bloc de glace emprisonné sous les dépôts de sable et gravier. Les sédiments ainsi déplacés forment alors une dépression à l'aspect d'entonnoir. On les retrouve souvent occupés par des lacs que l'on appelle alors « lacs de kettle », mais peuvent aussi être secs.

Les kames forment des collines irrégulières composées de sable et de gravier. Ils sont le résultat de l'accumulation des sédiments mobilisés par des rivières supra-glaciaires dans une dépression à la surface d'un glacier en phase de retrait, et qui se retrouvent sur le sol à la suite de la fonte complète du glacier. Ils peuvent constituer de bons aquifères lorsqu'ils sont d'épaisseur suffisante.



*Lac de kettle (Metabetchouan, Lac St-Jean)*

### ***Les sédiments marins et glaciolacustres d'eau profonde***

#### **Les argiles et les silts**

Le principal héritage des mers et lacs proglaciaires ayant inondé les terres suite à la fonte des glaciers est une épaisse couche d'argile marine (comme celle qui recouvre les Basses-Terres du Saint-Laurent) ou lacustre (comme celle qui recouvre l'Abitibi-Témiscamingue). Les argiles sont caractérisées par une très faible **conductivité hydraulique** malgré leur forte **capacité d'emmagasinement** de l'eau, ce qui leur confère la propriété d'**aquitard**. Elles forment donc une couche de protection contre l'infiltration des contaminants vers les eaux souterraines, mais ne constituent pas des zones de **recharge préférentielle**.



*Argile (à gauche) et rythmites d'argiles et de silts (à droite)*

Dans le cas des argiles lacustres, on les retrouve souvent sous forme de **rythmites**, où les minces couches d'argiles s'alternent avec les couches de **silts** plus épaisses. Chacune de ces couches marque un processus de sédimentation lié au rythme des saisons. En effet les saisons influencent l'énergie des courants d'eau, et plus les courants sont forts (comme c'est le cas au printemps), plus ils peuvent transporter des sédiments grossiers, les particules les plus fines ne pouvant se déposer qu'en eau calme (comme c'est le cas l'hiver). Cette séquence de deux couches représentant la sédimentation d'une année porte alors le nom de **varve**. Les silts sont aussi peu perméables.

### *Les sédiments d'eau peu profonde*

#### **Sables deltaïques et littoraux**

Pendant et suite au retrait du glacier, les eaux de fonte généraient des débits très importants, charriant des tonnes de sédiments. Ces sédiments s'accumulaient ensuite dans les plans d'eau marine surélevés et temporaires tels la mer de Champlain, ou encore dans les lacs proglaciaires d'eau douce, faute de courant suffisant pour les garder en suspension, formant ainsi des **deltas**. Ces dépôts forment aujourd'hui de grands aquifères. Les sables littoraux sont des dépôts qui ont été mis en place en bordure des plages de l'époque de la déglaciation avancée, en eau peu profonde, et peuvent aussi constituer de bons aquifères lorsqu'ils sont d'épaisseur suffisante.



Sables deltaïques, figures de courant (au centre)

### **LE PALÉO-DELTA DE LA SAINT-MAURICE : SOURCE D'EAU POTABLE POUR DES MILLIERS DE PERSONNES**

*Pendant et suite au retrait du glacier, les eaux de fonte étaient canalisées dans la rivière Saint-Maurice qui devait alors avoir un débit dix fois supérieur à son débit actuel et charriait des tonnes de sédiments (silts, sables et graviers). Une fois parvenus dans les eaux calmes de la mer de Champlain, ces sédiments s'accumulaient, faute de courant suffisant pour les garder en suspension. Au fur et à mesure que la mer de Champlain s'est retirée, le front du delta s'est avancé vers le fleuve Saint-Laurent, alors que la rivière Saint-Maurice a érodé ses propres sédiments et les sédiments sous-jacents dans sa vallée principale. Ces dépôts très poreux se sont, par la suite, remplis avec les eaux provenant des précipitations et ils forment aujourd'hui le plus grand aquifère de la région.*

Source : PACES – Mauricie (Leblanc et coll. 2013)

**Les sédiments éoliens**

## Dunes

Mis à découvert par le retrait des glaces et des eaux, les dépôts de surface sont soumis à l'action des vents intenses qui peuvent remanier leur morphologie en forme de **dunes**. Ces **dépôts éoliens** peuvent constituer de bons aquifères.



© J.-M. Dubois n° 91-04-33  
 Dunes, Îles de la Madeleine

## Les sédiments alluviaux

### Alluvions

Les sédiments alluviaux (ou **alluvions**) sont des matériaux transportés par les cours d'eau et déposés où le courant devient faible. Ils constituent la plaine alluviale des rivières. Ils peuvent contenir tous les types de granulométrie, soit du gravier à l'argile. Ils peuvent donc constituer des aquifères lorsque les matériaux sont suffisamment grossiers.



Alluvions  
 Les sédiments (ou dépôts) organiques



Rivière Hall, Bonaventure, Gaspésie

### Milieux humides

Les milieux humides sont définis comme l'ensemble des sites saturés d'eau ou inondés pendant une période suffisamment longue pour influencer la végétation et le substrat. Ces milieux peuvent jouer un rôle important dans le cycle hydrologique d'un bassin versant, notamment sur les processus de **recharge** et de **décharge** des eaux souterraines.



*Tourbière du Lac Rose, Centre-du-Québec*



Au Québec, les milieux humides sont majoritairement constitués de tourbières. Les tourbières ont une couche inférieure (le catotélme) composée de matière organique décomposée peu perméable, alors que la couche supérieure (l'acrotélme) est composée de matière organique fraîche perméable.

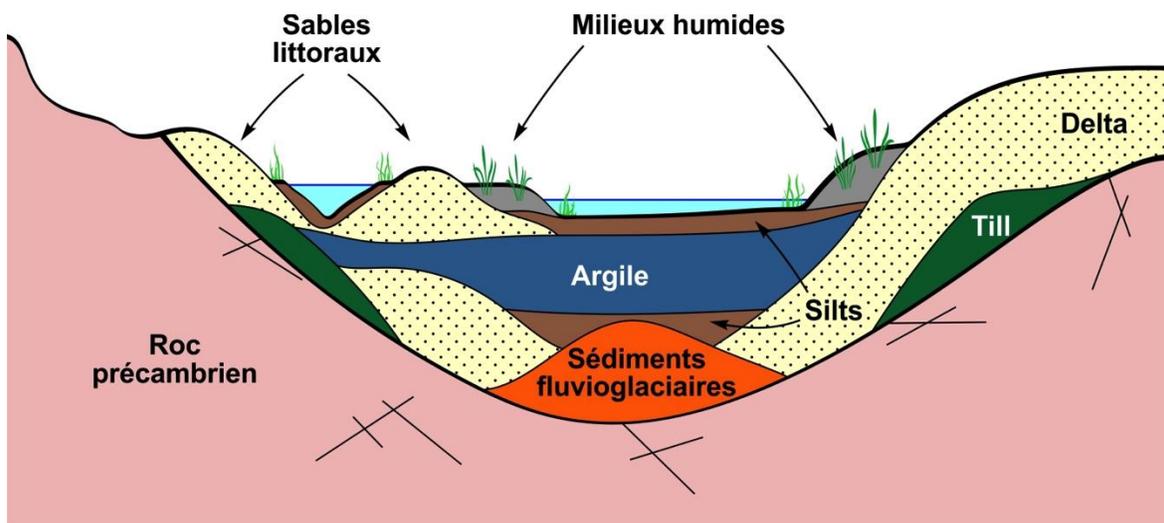
## 4. CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES

---

### SEQUENCES HYDROSTRATIGRAPHIQUES

Un **contexte hydrogéologique** représente un arrangement des unités de dépôts meubles et de roches (ou séquence hydrostratigraphique), en considérant leur perméabilité respective. La superposition des unités géologiques est aussi désignée par le terme **stratigraphie**. Ils permettent de visualiser comment sont organisés les unités géologiques en profondeur et d'identifier quelle séquence de dépôts meubles peut être rencontrée dans un secteur donné. Ces contextes exercent une influence sur l'écoulement et la qualité de l'eau souterraine. Ils sont établis dans le but de servir d'indicateurs régionaux des conditions hydrogéologiques présentes sur un territoire. L'agencement stratigraphique des unités géologiques en profondeur est connu

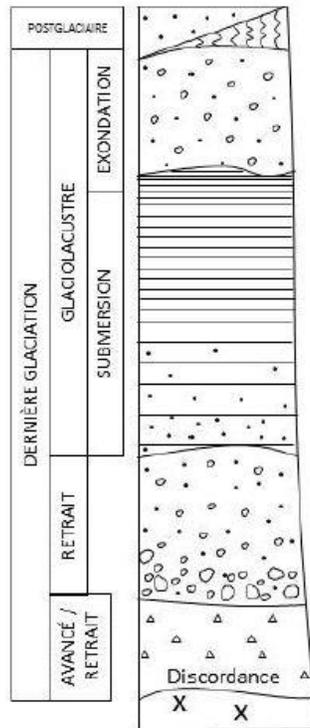
à partir des forages. La représentation des séquences hydrostratigraphiques est faite sur une coupe en deux dimensions ou sur une colonne stratigraphique. La superposition des différentes unités géologiques (dépôts meubles et roc) y est représentée afin d'en apprécier leur continuité, leur étendue et leur épaisseur. Par exemple, un contexte hydrostratigraphique pourrait être une zone définie par une couche de silts ou d'argile en surface, reposant sur des sédiments fluvioglaciers en contact avec l'aquifère de roc fracturé. Un autre contexte pourrait être défini par un dépôt de sables deltaïques en surface, reposant sur une unité de till en contact avec le roc (Figure 9). Ces séquences déterminent les conditions de confinement des aquifères.



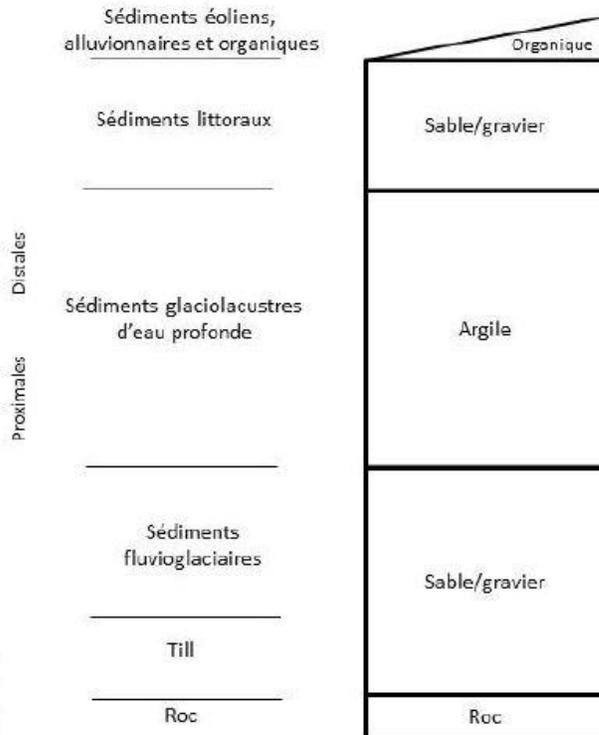
**Figure 9. Exemples de contextes hydrostratigraphiques**

La colonne stratigraphique illustre la séquence complète de sédimentation des dépôts meubles que l'on retrouve dans une région. Elle montre donc les sédiments les plus récents en surface et les plus anciens en contact avec le socle rocheux. Elle permet aussi de retracer l'histoire et les processus de mise en place des dépôts meubles. La Figure 10 présente un exemple de la colonne stratigraphique simplifiée utilisée pour le projet PACES – Abitibi-Témiscamingue (Partie 1) (Cloutier et coll., 2013) :

Colonne stratigraphique régionale



Colonne stratigraphique simplifiée utilisée pour le Projet PACES-AT1



**Figure 10. Exemple de colonne stratigraphique simplifiée (Cloutier et coll., 2013)**

### CONDITIONS DE CONFINEMENT

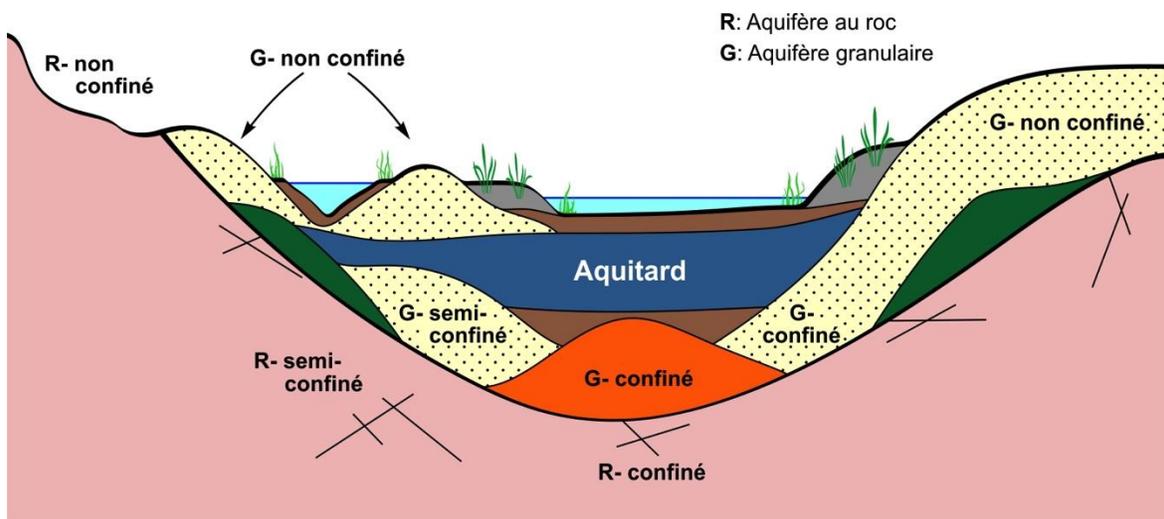
Le confinement d'un aquifère dépend de son recouvrement par une couche de matériaux peu perméables (aquitard) qui isole l'eau souterraine contenue dans l'aquifère. La nature et l'épaisseur des dépôts meubles constituant l'aquitard déterminent le niveau de confinement des aquifères (Figure 11). Le confinement influence les divers processus dynamiques et chimiques de l'eau souterraine, en limitant ou en favorisant la recharge de l'aquifère, ou encore en assurant sa protection par rapport à une contamination provenant directement de la surface.

#### *Aquifère non confiné*

Les **aquifères non confinés** (contenant une nappe phréatique libre ou « **nappe libre** ») sont en contact direct avec l'atmosphère et ne sont donc pas limités au-dessus par un aquitard. La position du **toit de la nappe** est libre de fluctuer. C'est le type d'aquifère utilisé par les puits de surface. Il peut être directement rechargé par l'infiltration en surface et est généralement plus vulnérable à la contamination.

### *Aquifère confiné*

Les **aquifères confinés** (contenant une nappe phréatique captive ou « **nappe captive** ») sont « emprisonnés » sous un aquitard. Une nappe captive est donc légèrement sous pression et le niveau piézométrique de la nappe correspond au niveau où l'eau retrouve son équilibre avec la pression atmosphérique. La nappe est faiblement alimentée par l'infiltration verticale depuis la surface. Elle reçoit généralement son alimentation latéralement, en provenance de l'**amont**, là où la couche confinante n'est plus présente, c.à.d. où la nappe est libre. Une nappe captive se trouve mieux protégée qu'une nappe libre des contaminations provenant directement de la surface.



**Figure 11. Confinement des aquifères**

### *Aquifère semi-confiné*

Les **aquifères semi-confinés** (contenant une **nappe semi-captive**) sont des cas intermédiaires dans lesquels les couches confinantes de l'aquifère (aquitard) ne sont pas totalement imperméables ou sont de faible épaisseur. Dans ce cas, il peut y avoir une circulation verticale d'eau limitée entre les couches géologiques.

### *Cas particuliers*

On observe aussi des cas particuliers tels que les **nappes perchées**, suspendues au-dessus du niveau de la nappe phréatique et retenues par une couche de matériaux imperméables.

Il existe aussi des cas où le confinement est discontinu, c'est-à-dire où les couches confinantes sont « trouées » et laisse infiltrer localement l'eau jusqu'à l'aquifère sous-jacent.

On parle d'**aquifère double** lorsque deux formations aquifères se superposent, séparées ou non par un aquitard.

## 5. LES EAUX SOUTERRAINES

### CYCLE DE L'EAU, BASSIN VERSANT ET BILAN HYDRIQUE

Sur Terre, l'eau coexiste en trois phases: vapeur, liquide et solide. Le mouvement continu de l'eau sur, au-dessus et en-dessous de la surface de la Terre, décrit **le cycle de l'eau** (Figure 12). Le cycle de l'eau est un système en boucle fermée, sans point de départ spécifique, schématisé par le chemin que les molécules d'eau parcourent entre les différents réservoirs (**atmosphère, hydrosphère, biosphère et lithosphère**), grâce aux processus d'**évaporation**, de **condensation**, de **précipitation** et d'**écoulement**. Globalement, environ 61% de l'eau des précipitations s'évapore, 16% s'écoule en surface et rejoint les cours d'eau et 23% s'infiltrate et alimente les nappes phréatiques.

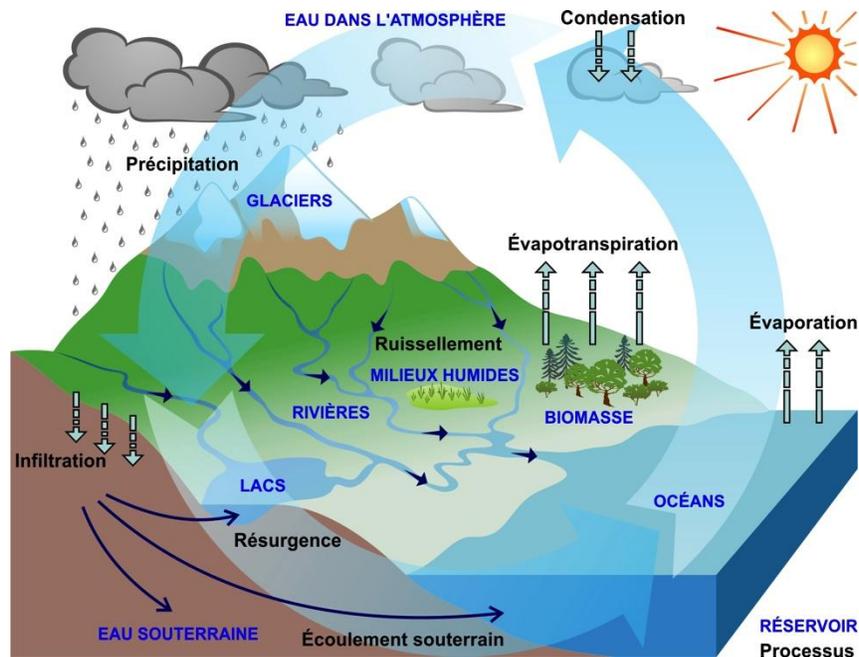


Figure 12. Le cycle hydrologique

### Eau disponible

La Terre est recouverte de plus de 70% d'eau. On estime que les océans en contiennent de 95 à 98 % (UNESCO-WWAP 2006); les 2 à 5 % restant sont répartis entre les autres grands réservoirs et constituent les seules réserves d'eau douce mondiale. De cette proportion, une grande partie est stockée dans les glaciers (près de 70 %), mais cette eau est difficilement disponible pour répondre aux besoins en eau potable. Les lacs et les rivières ne représentent

qu'une infime partie de l'eau douce disponible (moins de 1 %), tandis que l'eau souterraine est beaucoup plus abondante (environ 30 %) (Figure 13).

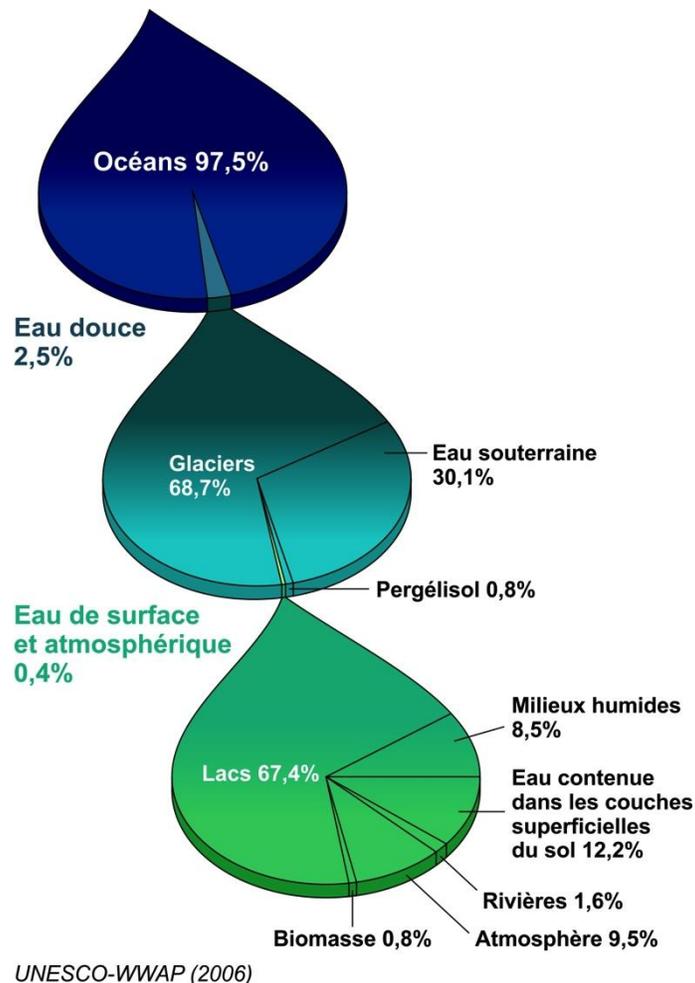
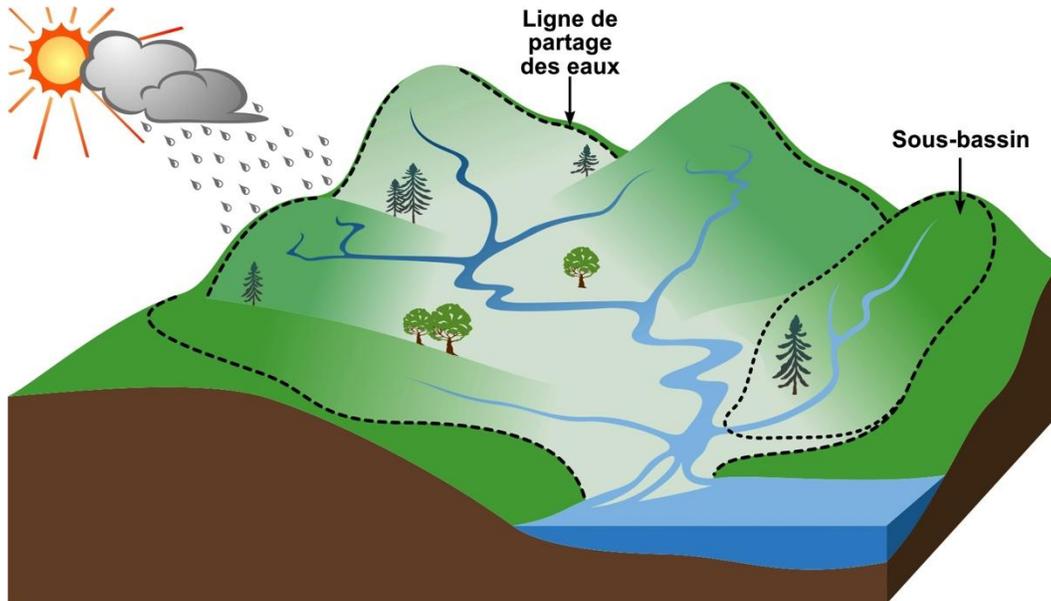


Figure 13. Eau disponible

### *Bassin versant et réseau hydrographique*

L'eau, sous forme de pluie tombant sur le sol, s'écoule par gravité, du point le plus élevé vers le point le moins élevé (de l'**amont** vers l'**aval**). La direction d'écoulement de l'eau est donc limitée par des frontières naturelles topographiques appelées **lignes de partage des eaux**. Ces dernières constituent les limites du **bassin versant** (Figure 14), qui peut être défini comme le territoire délimité par les élévations du terrain à l'intérieur duquel l'eau qui s'écoule en surface se dirige vers le même **exutoire**.

En première approximation, on considère généralement que la ligne de partage des eaux souterraines correspond à celle des eaux qui ruissellent en surface. L'eau qui ruisselle s'écoule dans le sens de la pente et se concentre dans des dépressions du sol, les rivières et les lacs. Connectés les uns aux autres, les cours d'eau et plans d'eau forment un **réseau hydrographique**.



**Figure 14. Bassin versant et sous-bassin**

### **Bilan hydrique**

Lorsque les précipitations atteignent le sol, une part de celles-ci retourne à l'atmosphère par évaporation, une part ruisselle à la surface et une part s'infiltrate dans le sol. Ce sont des processus importants du **bilan hydrique** (Figure 15), qui peut se traduire à l'aide de l'équation suivante :

$$P = ET + R_{\text{surf}} + R \quad \text{où}$$

**P** sont les **précipitations**, sous forme de pluie ou de neige - c'est la source d'apport en eau qui dépend principalement des conditions climatiques.

**ET** est l'**évapotranspiration**, qui correspond à l'eau retournée à l'atmosphère par évaporation et par transpiration des plantes - elle dépend entre autres du type de végétation, des propriétés physiques du sol, de la température, du taux d'humidité dans l'air et de l'insolation.

**$R_{surf}$**  est le **ruissellement** de surface, qui survient lorsque la capacité d'infiltration du sol est dépassée de sorte que l'eau ne peut plus y pénétrer et s'écoule donc en surface - il dépend entre autres du degré d'humidité antérieur des terrains, de la pente, du type de sol et de l'utilisation du sol.

**R** est la **recharge**, qui correspond à l'eau qui s'infiltrate dans le sol et qui atteint la nappe phréatique.

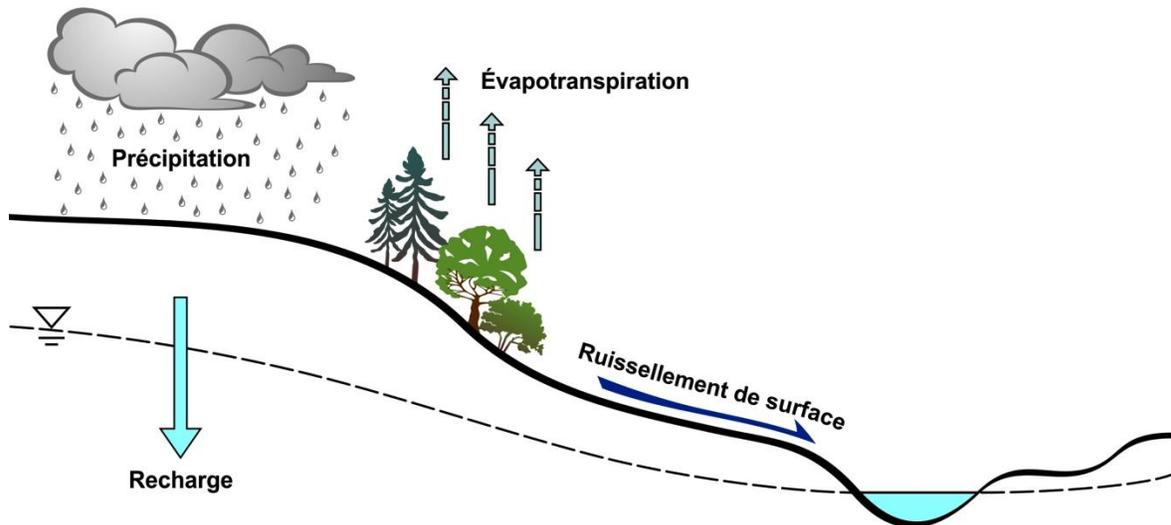


Figure 15. Bilan hydrique

Pour en savoir plus :

**Le cycle hydrologique** (Environnement Canada 2013a)

[En ligne : <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=23CEC266-1>]

**Le cycle de l'eau souterraine** (MDDELCC 2001)

[En ligne : [http://www.mddefp.gouv.qc.ca/jeunesse/chronique/2001/0110\\_campagne.htm](http://www.mddefp.gouv.qc.ca/jeunesse/chronique/2001/0110_campagne.htm)]

## ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE

Il est plus facile d'étudier et de comprendre les mécanismes affectant l'eau de surface, car celle-ci est visible. La ressource en eau souterraine, plus difficilement observable, demande une compréhension des milieux géologiques dans lesquels l'eau s'écoule.

Contrairement à certaines croyances populaires, l'eau ne circule pas sous terre dans des rivières souterraines, bien que de véritables cours d'eau souterrains existent dans de rares cas (milieu karstique). L'eau est plutôt présente dans le sol en comblant les interstices constitués par les **pores** et les fractures, comme dans une éponge imbibée d'eau. Ces interstices peuvent contenir de l'air comme de l'eau. Lorsqu'ils sont totalement remplis d'eau et qu'il n'y a plus d'air, on parle alors de **zone saturée** (où une **nappe phréatique** peut circuler), contrairement à la **zone non saturées** (ou **zone vadose**), où les pores contiennent encore de l'air.

L'eau qui s'infiltré dans le sol va percoler verticalement et traverser la zone non saturée en eau pour atteindre la zone saturée et ainsi contribuer à la **recharge** de l'aquifère (Figure 16). Comme pour l'eau en surface, l'eau souterraine va s'écouler dans l'aquifère sous l'effet de la gravité. L'eau souterraine s'écoule toutefois beaucoup plus lentement que l'eau dans les rivières.

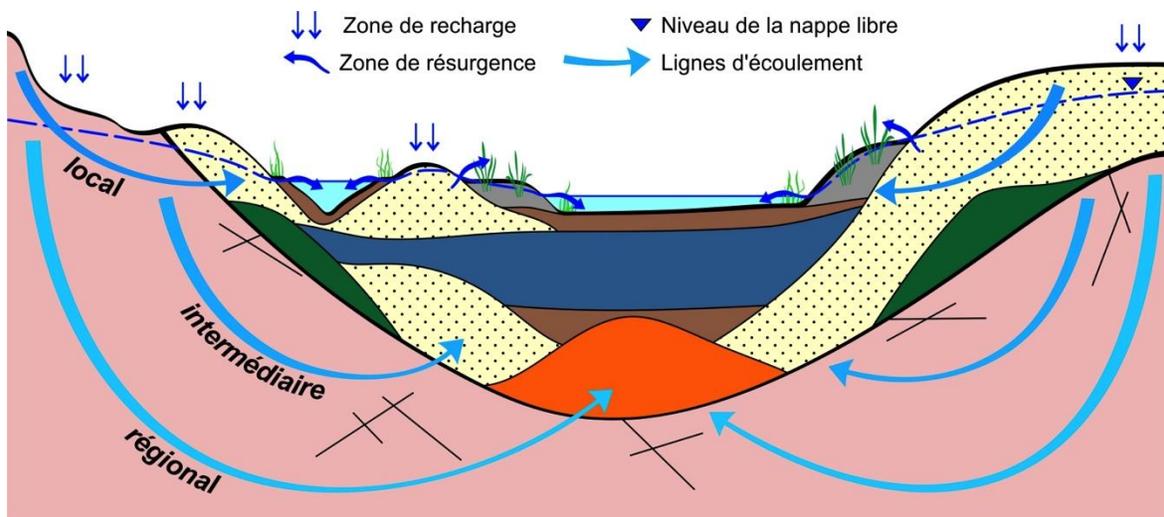


Figure 16. Écoulements souterrains, zones de recharge et de résurgence

Dans le sol, l'eau ne se déplace pas à une vitesse constante. Imaginez que vous laissez rouler une bille le long d'une pente. La bille suivra la trajectoire où l'inclinaison de la pente sera la plus forte, de telle façon que plus la pente est forte, plus la bille roulera vite. En plus de la pente, si le parcours change de surface (par exemple, si elle passe d'une zone en terre battue à du gazon), elle subira un changement de vitesse. Nous pouvons imaginer l'eau souterraine comme

une multitude de petites billes qui circulent dans le sol. Sa vitesse dépend donc des **propriétés hydrauliques** de l'aquifère et du taux de variation de la pression de l'eau. Dans un délai variant entre plusieurs jours à plusieurs milliers d'années, cette eau fera éventuellement **résurgence** en surface dans le réseau hydrographique. On distingue d'ailleurs trois échelles d'écoulement de l'eau souterraine, soit l'échelle locale, intermédiaire, et régionale.

### PIEZOMETRIE

Le **niveau piézométrique** ou la **charge hydraulique** représente l'élévation à laquelle l'eau remonte dans un puits pour atteindre l'équilibre avec la pression atmosphérique. Dans le cas d'une nappe libre, le niveau piézométrique correspond au **toit de la nappe**. Dans le cas d'une nappe captive, le niveau piézométrique sera supérieur ou inférieur au toit de la nappe contenue dans un aquifère situé au-dessus, selon la pression exercée sur l'eau souterraine. Un puits est dit artésien **jaillissant** lorsque le niveau piézométrique est plus élevé que la surface du sol (Figure 17).

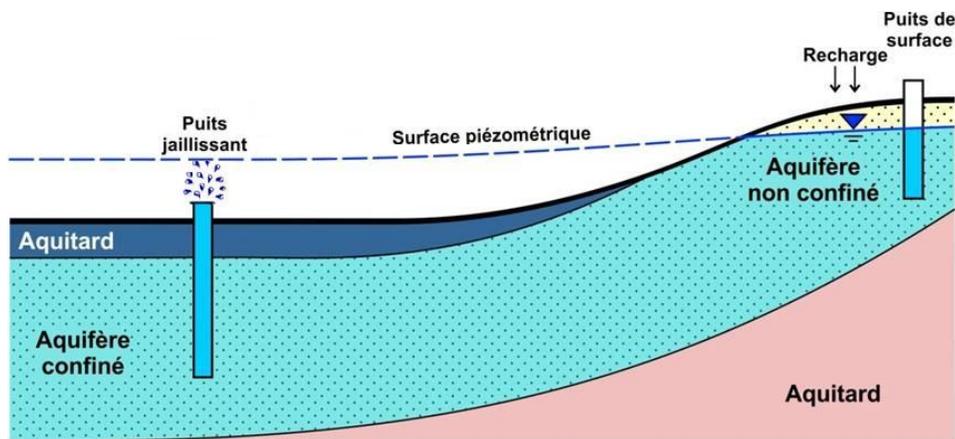


Figure 17. Puits jaillissant et puits de surface

En reliant tous les niveaux piézométriques mesurés sur un territoire, on obtient la **surface piézométrique**. Pour représenter celle-ci sur une carte, des lignes sont tracées entre différents points de même niveau piézométrique (appelées **isopièzes** ou **courbes piézométriques**), comme sur une carte topographique. L'écoulement de l'eau souterraine s'effectue perpendiculairement aux isopièzes, soit des points de piézométrie élevée aux points de piézométrie plus basse (Figure 18). En plus de la direction d'écoulement, la carte piézométrique permet d'identifier si la surface piézométrique est plus élevée que le niveau du lit d'un cours d'eau. Dans ce cas, l'aquifère participe à l'alimentation du cours d'eau (la rivière est alors une zone de **résurgence**). Dans le cas contraire, si la surface piézométrique est plus basse que le niveau du lit du cours d'eau, c'est la rivière qui alimente l'aquifère (la rivière est alors une zone

de **recharge**). Cette dernière situation n'est pas le cas général au Québec, mais elle peut se présenter en amont immédiat d'une chute ou d'un rapide le long d'un cours d'eau, par exemple.

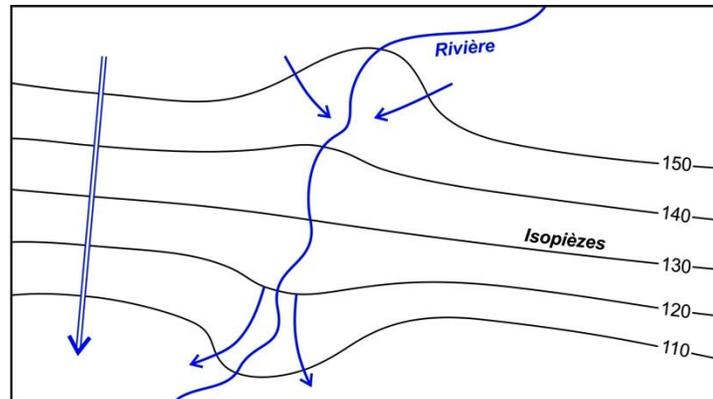


Figure 18. Piézométrie

Les réseaux de suivi du niveau des nappes d'eau souterraine permettent d'évaluer les impacts à long terme des prélèvements d'eau et des changements climatiques sur les eaux souterraines. Typiquement au Québec, le niveau des nappes monte au printemps lors de la fonte des neiges, puis s'abaisse lentement jusqu'à la fin de l'été. Il montre souvent une autre remontée à l'automne lorsque les précipitations se maintiennent alors que l'évapotranspiration est plutôt faible. Durant la période hivernale il redescend jusqu'au printemps suivant.

Pour en savoir plus :

**Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec** (MDDELCC 2014a)

[En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/piezo/>]

### RECHARGE ET RESURGENCE

La **recharge** est le processus qui permet le renouvellement de l'eau souterraine. Elle correspond à la quantité d'eau qui alimente l'aquifère depuis l'infiltration des précipitations à la surface. À l'échelle régionale, il est nécessaire de déterminer les zones de recharge importantes pour mieux les protéger. L'estimation de la recharge d'un aquifère par unité de temps (ou **taux de renouvellement**) est essentielle pour assurer la pérennité de l'eau souterraine.

La recharge est liée aux conditions climatiques, à l'occupation du sol et aux propriétés physiques du sol, soit sa capacité à laisser s'infiltrer l'eau. Comme ces facteurs varient d'un endroit à l'autre, la recharge n'est pas uniforme sur l'ensemble du territoire. Ainsi, les zones d'affleurement de roches ou de dépôts meubles perméables constituent les zones

préférentielles de recharge. À l'inverse, une couverture argileuse épaisse et continue limite la recharge. En milieu urbain, l'imperméabilisation des surfaces par le l'asphaltage des routes et des stationnements, le compactage des sols et la présence d'immeubles et autres structures ont un impact important sur la recharge car ils empêchent l'eau de s'infiltrer.

Au terme de leur parcours souterrain, les eaux souterraines font **résurgence** en surface. Ces zones de résurgence sont en bonne partie diffuses (c.à.d. largement étendue), et se traduisent par la formation de **milieux humides** ou par l'exfiltration d'eau souterraine en bordure ou même au fond des cours d'eau. Elles peuvent aussi parfois être ponctuelles (c.à.d. en un point précis) et ainsi former des **sources** ou des têtes de ruisseaux situés en pied de talus. En période d'**étiage**, l'essentiel de l'eau qui s'écoule dans les rivières provient de l'apport des eaux souterraines. C'est ce qu'on appelle le **débit de base** des cours d'eau. Les zones de résurgence jouent un rôle vital dans le maintien des écosystèmes, notamment en fournissant un apport constant en nutriments et en eau pour la faune et la flore aquatiques.



*Source de l'Hermitte, Abitibi*

## 6. QUANTITÉ

---

### *PROPRIETES HYDRAULIQUES*

Les **propriétés hydrauliques** permettent d'analyser de façon quantitative l'aptitude d'une formation géologique à contenir de l'eau et à la laisser circuler. Elles dépendent à la fois des propriétés du fluide, en l'occurrence l'eau, et des propriétés physiques du milieu permettant l'emmagasinement et l'écoulement de l'eau. Les hydrogéologues effectuent des **essais hydrauliques** (par exemple, des essais de pompage dans des puits), pour mesurer plusieurs paramètres tels que la **conductivité hydraulique (K)**, la **transmissivité (T)**, le **coefficient d'emmagasinement (S)** et la **capacité spécifique**. Le suivi du rabattement et de la remontée du niveau piézométrique dans un puits de pompage et dans des puits d'observations pendant et après le pompage permet de caractériser l'aquifère. On doit notamment établir le temps

nécessaire après l'arrêt du pompage pour que le système revienne à son équilibre, par exemple pour que le niveau piézométrique retourne à sa valeur initiale, que l'on appelle le **niveau statique (h<sub>0</sub>)**.

La mesure de la différence de charge hydraulique entre deux points alignés dans la direction de l'écoulement permet d'estimer les **gradients de charge hydraulique (i)**, soit la différence de charge hydraulique divisée par la distance entre les deux points (Figure 19). Connaissant ce gradient et la conductivité hydraulique de l'aquifère, on peut alors estimer la quantité d'eau souterraine qui circule dans le sous-sol, c.à.d. le débit (Q : L<sup>3</sup>/t).

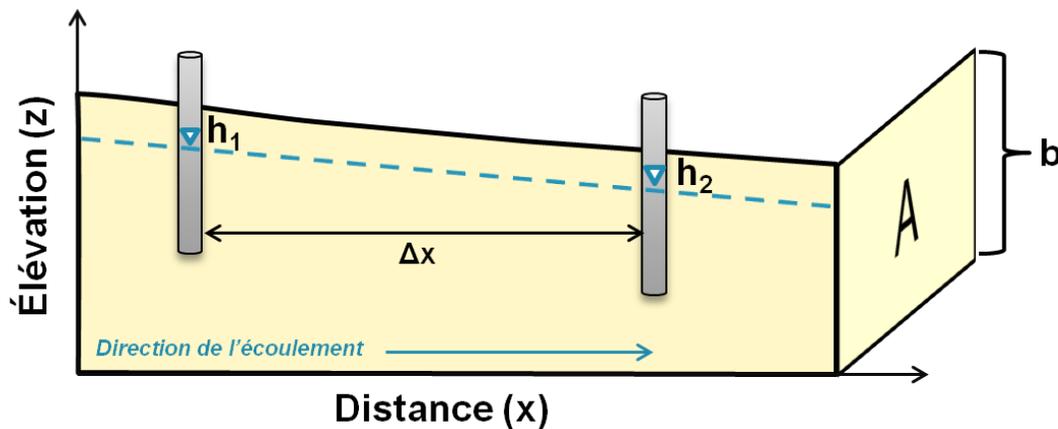


Figure 19. Gradient de charge hydraulique

### Quelques formules...

$$i = (h_1 - h_2) / \Delta x$$

$$Q = KAi \text{ (c'est la fameuse loi de Darcy)}$$

$$T = Kb$$

Avec

h = niveau piézométrique ou charge hydraulique {L}

i = gradient de charge hydraulique {sans unité}

Q = débit {L<sup>3</sup>/t}

K = conductivité hydraulique {L/t}

A = aire de la surface traversée {L<sup>2</sup>}

T = transmissivité {L<sup>2</sup>/t}

b = épaisseur de l'aquifère {L}

## LES PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES

*L'eau souterraine remplit les porosités du milieu géologique, c'est-à-dire les fractures et les espaces entre les grains, que ce soit dans les dépôts meubles ou dans le roc. Plus la porosité du milieu géologique est élevée, plus il y a d'espace disponible pour emmagasiner de l'eau dans ce qui constitue l'aquifère. Pour qu'une unité géologique soit intéressante pour l'approvisionnement en eau souterraine, il faut aussi que cette eau se renouvelle, c'est-à-dire qu'il faut que les vides communiquent entre eux pour que l'eau puisse circuler d'un endroit à un autre. Pour évaluer si le contenant qu'est le milieu géologique constitue un bon aquifère, il faut connaître sa porosité et son degré de fracturation. Pour définir la capacité d'une formation géologique à transmettre l'eau rapidement d'un vide à l'autre, il faut mesurer sa conductivité hydraulique. Plus cette dernière est élevée et plus l'aquifère est productif. Il est possible de mesurer la conductivité hydraulique (K) du milieu par différents essais réalisés dans les trous de forages (obturateurs, injection, pompage, etc.).*

Source : PACES – Bécancour (Larocque et coll. 2013)

## POMPAGE ET PUIITS

Afin d'utiliser l'eau, nous construisons des puits par lesquels nous pompons l'eau souterraine. Le pompage modifie le sens d'écoulement de l'eau souterraine, car il crée autour du puits une baisse de pression, ce qui appelle l'eau en direction du puits. Cet écoulement convergent vers le puits affectera l'écoulement souterrain jusqu'à une distance appelée le **rayon d'influence** ; jusqu'à cette distance tout autour du puits le niveau de la nappe est influencé selon l'importance du pompage. Le toit de la nappe phréatique s'abaissera en prenant la forme d'un cône que l'on nomme **cône de rabattement** (Figure 20).

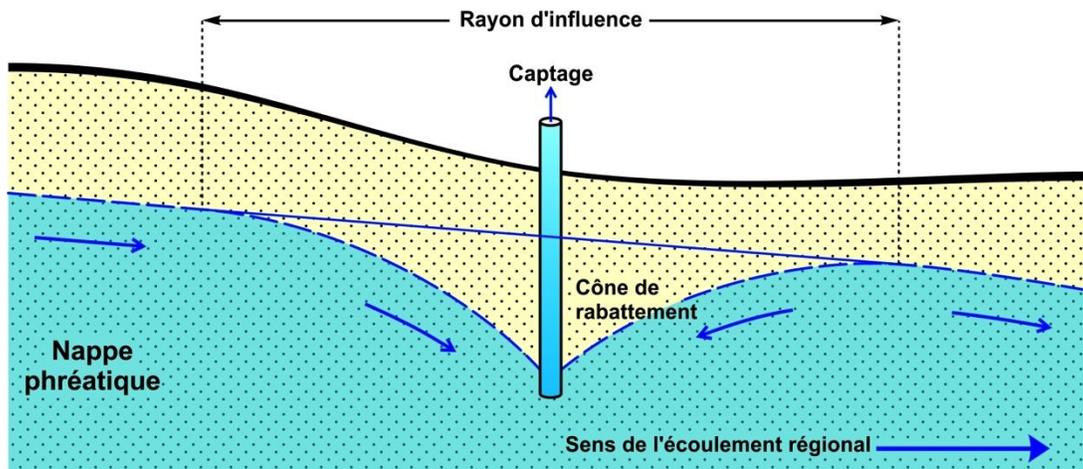


Figure 20. Cône de rabattement et rayon d'influence

Il y a différents types d'ouvrages de captage de l'eau souterraine :

- **Puits tubulaires** : généralement de grande profondeur (45 m en moyenne au Québec) et de petit diamètre (152 mm) ;
- **Puits de surface** : profondeur d'au plus 9 m à partir de la surface et un diamètre intérieur normalement supérieur à 60 cm ;
- **Pointe filtrante** : diamètre intérieur du tubage est au plus 8 cm ;
- **Captage de source** : capte l'eau qui resurgit naturellement à la surface.

Les puits installés dans les aquifères granulaires ont généralement une capacité de production plus importante que les puits installés au roc.

Pour en savoir plus :rents types de puits et de pompes à eau, consultez le document «Le puits», un guide réf.rence

36

**Eaux souterraines – Le puits** (MDDELCC 2014b)

[En ligne : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/au/es/puitsouterrains/index.htm>]

**Eaux souterraines – Entretien d'un ouvrage de captage** (MDDELCC 2014b)

[En ligne : <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/souterraines/puits/entretien.htm>]

**Eaux souterraines – Exigences réglementaires concernant les divers types de captage** (MDDELCC 2014b)

[En ligne : <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/souterraines/puits/exigences.htm>]

***Eaux souterraines – Outils de détermination d’aires d’alimentation et de protection de captage d’eau souterraine*** (MDDELCC 2014b)

[En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/alim-protect/index.htm>]

***Eaux souterraines – Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection*** (MDDELCC 2014b)

[En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/prelevements/reglement-prelevement-protection/index.htm>]

### ***RENDEMENT POTENTIEL DES AQUIFERES***

La productivité d’un aquifère est sa capacité à fournir un débit d’eau souterraine important de manière soutenue. La notion de rendement potentiel des aquifères, telle que retenue ici, fait essentiellement référence au débit qu’il est physiquement possible d’extraire de façon continue d’un aquifère. Suivant cette désignation, le rendement potentiel des aquifères est estimé indirectement sur la base (1) des caractéristiques géométriques, (2) de la conductivité hydraulique et (3) du taux de recharge des aquifères. Ainsi, le rendement potentiel d’un système aquifère sera principalement fonction de sa taille, de l’aisance avec laquelle il laisse circuler l’eau souterraine et du taux auquel la ressource en eau peut s’y renouveler.

La cartographie de la **transmissivité** des aquifères à l’échelle régionale est utilisée comme point de départ pour l’évaluation comparative de leur rendement potentiel. Tel que défini préalablement, ce paramètre représente le produit de la **conductivité hydraulique** d’un aquifère par son épaisseur. Il est proposé que pour un taux de recharge donné, à l’échelle régionale, la transmissivité d’un environnement aquifère constituera un reflet indirect du débit extractible de la ressource. Essentiellement, les **aquifères** granulaires, caractérisés par une transmissivité plus élevée, sont jugés susceptibles de présenter un rendement potentiel plus important en comparaison des autres aquifères. Notons également que le rendement potentiel des aquifères pour un secteur donné sera fonction de la superficie pour laquelle sa transmissivité est considérée.

Pour en savoir plus :

***Rapport sur l’état de l’eau et des écosystèmes aquatiques au Québec – État de la quantité des nappes d’eau souterraine*** (MDDELCC 2014c)

[En ligne : [http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-qte-eau-Quelle-situation\\_NappeH2OSouterraine.htm](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-qte-eau-Quelle-situation_NappeH2OSouterraine.htm)]

## 7. QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE

---

### GEOCHIMIE DE L'EAU SOUTERRAINE

Tout au long de son cycle, l'eau est soumise à des processus successifs qui modifient sa composition chimique et affecte ainsi sa qualité. Les processus hydrogéochimiques sont généralement contrôlés ou influencés par différents facteurs tels que la dissolution de certains minéraux présents dans les roches et dans les sols, l'infiltration et l'écoulement de l'eau dans l'aquifère, les interactions entre les minéraux dissous et avec la matière organique, et la salinisation des eaux lorsque l'eau souterraine est en contact prolongé avec des argiles d'origine marine. Plus le **temps de résidence** de l'eau dans un aquifère est long et plus elle atteint des couches profondes, plus elle sera chargée en minéraux dissous. Selon les processus auxquels elle est soumise, l'eau souterraine acquiert ainsi une signature géochimique particulière en fonction du milieu où elle se trouve et de ceux qu'elle a traversé le long de son parcours. Ces signatures permettent de retracer l'origine des eaux souterraines, l'histoire de leurs interactions et leur **âge**.

### Types d'eau

Les types d'eau sont indicateurs de l'origine des eaux souterraines (Figure 21). Par exemple, les eaux souterraines de **type bicarbonaté-calcique** ( $\text{Ca-HCO}_3$ ), liées à la **dissolution** des carbonates par les **eaux météoriques**, sont les plus fréquentes au Québec. Elles se situent surtout dans les zones préférentielles de recharge car les aquifères à nappe libre renferment généralement des eaux souterraines moins âgées et moins minéralisées que les aquifères à nappe captive.

À l'inverse, les eaux plus anciennes et profondes sont souvent de **type chloruré-sodique** ( $\text{Na-Cl}$ ) car leur long temps de résidence leur confère une salinité élevée caractéristique des **saumures** ou des eaux d'origine marine. Les échantillons d'eau d'origine marine proviennent entre autre des nappes captives situées sous la plaine argileuse des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les chlorures peuvent aussi tirer leur origine des activités anthropiques telles que l'épandage de sels déglacant, et peuvent donc se retrouvés aussi dans les eaux de recharge récentes.

Les eaux de **type sulfaté-sodique** ( $\text{Na-SO}_4$ ) ont une évolution intermédiaire entre les types bicarbonaté-calcique et chloruré-sodique. Elles résultent des processus **d'échanges cationiques** entre le calcium et le sodium et de la dissolution de minéraux contenant du soufre communément présents dans la roche, tels la pyrite par exemple. Elles cheminent ensuite pour se mélanger graduellement avec les eaux salines profondes.

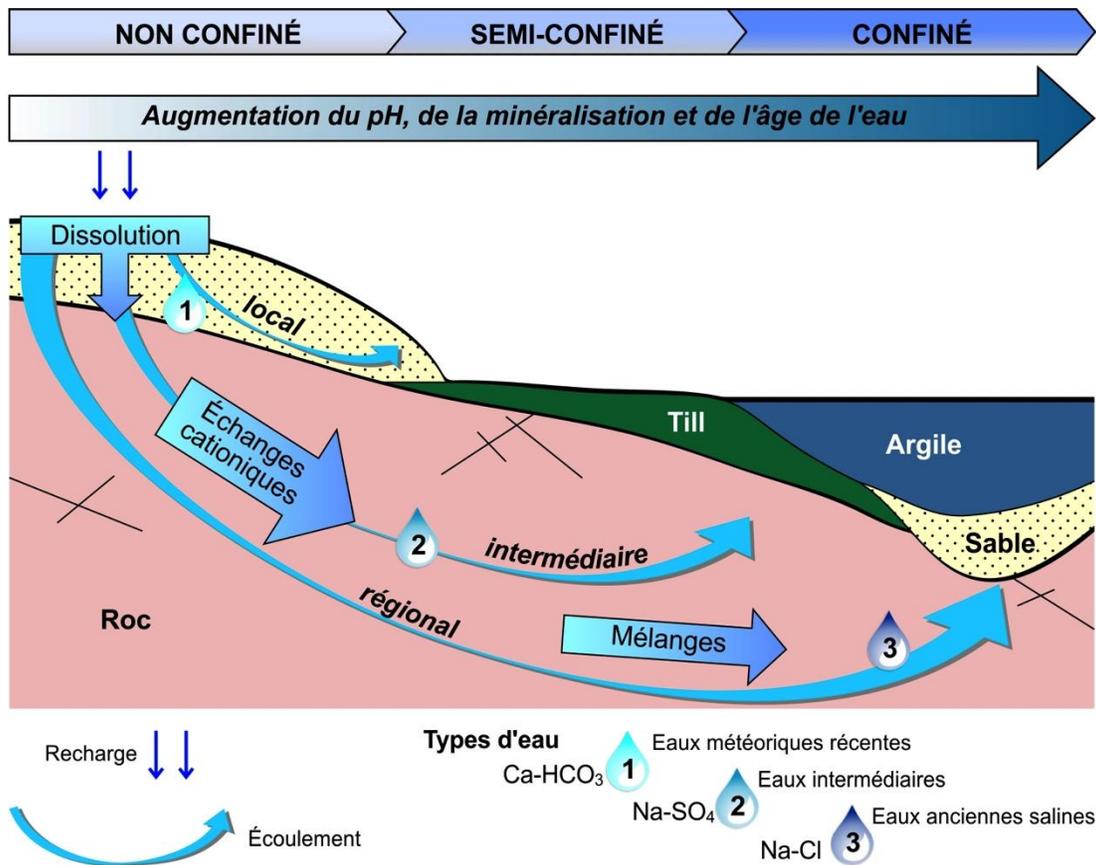


Figure 21. Évolution géochimique des eaux souterraines

Pour en savoir plus :

Rapport du CCME : **Science de l'eau et politiques: Qualité des eaux souterraines** (Crowe et coll. 2003)

[En ligne : [https://www.ec.gc.ca/inre-nwri/795D939F-E681-4A71-9E7B-EBECFCCB701C/2002\\_grndwtrqlty\\_wkshp\\_f.pdf](https://www.ec.gc.ca/inre-nwri/795D939F-E681-4A71-9E7B-EBECFCCB701C/2002_grndwtrqlty_wkshp_f.pdf)]

Dans ce rapport, les connaissances scientifiques actuelles, les besoins en recherche et les perspectives stratégiques correspondantes sont documentés pour les domaines suivants :

- les milieux de roche fracturée
- les sources naturelles de contamination
- les argiles comme barrière au transport des contaminants
- les pathogènes dans les eaux souterraines

- les impacts de l'agriculture sur les eaux souterraines
- les problèmes dans le monde rural et municipal
- l'extraction minière et les métaux
- les déversements de liquides non aqueux
- les problèmes dans le secteur pétrolier
- l'évaluation des risques
- la qualité des eaux de puits en milieu rural

Récemment, le MDDELCC a publié un rapport sur l'état de l'eau et des systèmes aquatiques au Québec, dans lequel on retrouve un chapitre sur la qualité des nappes d'eau souterraine : **Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec – La qualité des nappes d'eau souterraine** (MDDELCC 2014c)

[En ligne : [http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-qualite-eau-Quelle-situation\\_NappeH2OSouterraine.htm](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-qualite-eau-Quelle-situation_NappeH2OSouterraine.htm)]

#### CRITERES DE QUALITE DE L'EAU

La géochimie de l'eau souterraine peut comporter certaines substances indésirables présentes de façon naturelle à cause des caractéristiques géologiques du milieu. Des contaminants d'origine anthropique, découlant des activités humaines exercées en surface, peuvent aussi affecter l'eau souterraine. Les organismes gouvernementaux ont élaboré deux types de critères de qualité concernant l'eau potable.

Les **concentrations maximales acceptables** (CMA) sont des normes de qualité, exigées par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (Q-2, r.40) de la Loi sur la qualité de l'environnement du Québec (MDDELCC 2014d), visant à éviter des risques pour la santé humaine. Les CMA incluent des normes bactériologiques, ainsi que des normes physicochimiques portant sur des substances inorganiques et sur des substances organiques. Par exemple, les nitrates (en  $\text{N-NO}_3$ ) ne doivent pas dépasser 10 mg/L pour prévenir la méthémoglobinémie (syndrome du bébé bleu) et est aussi considéré comme possiblement cancérigène pour l'être humain. Dans le cas du baryum, la concentration ne doit pas dépasser 1 mg/L car une trop grande consommation pourrait entraîner des maladies cardiovasculaires ou une augmentation de la pression artérielle. Dans le cadre des PACES, les échantillons ont été envoyés dans un laboratoire accrédité par le MDDELCC pour l'analyse des paramètres de potabilité donnés dans le tableau 1.

**Tableau 1 : Paramètres de potabilité analysés dans le cadre des PACES**

Paramètre	Concentration maximale acceptable (CMA)	Norme fondée sur :
<b>Antimoine (Sb)</b>	0,006 mg/L	Changements microscopiques au niveau des organes et des tissus (thymus, reins, foie, rate, thyroïde)
<b>Arsenic (A)</b>	0,01 mg/L	Cancer (poumon, vessie, foie et peau); effets cutanés, vasculaires et neurologiques (engourdissement et picotement des extrémités)
<b>Bore (B)</b>	5 mg/L	Effets sur la reproduction (atrophie testiculaire et spermatogenèse)
<b>Baryum (Ba)</b>	1,0 mg/L	Maladies cardiovasculaires et augmentation de la pression artérielle
<b>Cadmium (Cd)</b>	0,005 mg/L	Lésions rénales et ramollissement des os
<b>Chrome (Cr)</b>	0,05 mg/L	Grossissement du foie et irritation de la peau ainsi que du tractus gastro-intestinal et des voies respiratoires provoqués par le chrome hexavalent
<b>Fluor (F)</b>	1,5 mg/L	Fluorose dentaire modérée (effet cosmétique)
<b>Nitrite/Nitrate (NO<sub>2</sub>-NO<sub>3</sub>)</b>	45 mg/L sous forme de nitrate; 10 mg/L sous forme d'azote	Méthémoglobinémie (syndrome du bébé bleu), possiblement cancérigène pour l'être humain
<b>Plomb (Pb)</b>	0,01 mg/L	Effets biochimiques et neurocomportementaux (développement intellectuel et comportement) chez les nourrissons et les jeunes enfants, anémie, cancérigène
<b>Sélénium (Se)</b>	0,01 mg/L	Perte de cheveux et affaiblissement des ongles lors d'expositions extrêmement élevées
<b>Uranium (U)</b>	0,02 mg/L	Effets sur les reins (différentes lésions)

Les **objectifs esthétiques** (OE), recommandées par le Comité fédéral-provincial-territorial sur les eaux potables (Santé Canada 2012), sont des recommandations pour les paramètres ayant un impact sur les caractéristiques esthétiques de l'eau (couleur, odeur, goût), mais n'ayant pas d'effet néfaste reconnu sur la santé humaine. Les paramètres dont la présence peut entraîner la corrosion ou l'entartrage des puits ou des réseaux d'alimentation en eau sont aussi visés par ces objectifs. Par exemple, pour le fer, les concentrations ne doivent pas dépasser 0,3 mg/L.

Cette recommandation est fondée sur le goût et les taches laissées sur la lessive et les accessoires de plomberie. Dans le cas de la dureté, une concentration variant entre 80 et 100 mg/L est recommandée afin de constituer un équilibre acceptable entre la corrosion et l'entartrage. Dans le cadre des PACES, les échantillons ont été envoyés dans un laboratoire accrédité par le MDDELCC pour l'analyse des paramètres esthétiques donnés dans le tableau 2.

**Tableau 2 : Paramètres esthétiques analysés dans le cadre des PACES**

Paramètre	Objectif esthétique (OE)	Recommandation fondée sur :
<b>Aluminium (Al)</b>	≤ 0,1 mg/L (valeur opérationnelle)	À l'heure actuelle, le poids de la preuve n'indique pas d'effets nocifs aux concentrations présentes dans l'eau potable.
<b>Chlore (Cl)</b>	aucun, mais lorsque sous forme de chlorure : ≤ 250 mg/L	Lorsque sous forme de chlorure : goût et possibilité de corrosion du réseau de distribution
<b>Cuivre (Cu)</b>	≤ 1 mg/L	Goût et taches sur la lessive et les accessoires de plomberie. Effet nocif sur la santé seulement à des concentrations excessivement élevées.
<b>Dureté totale (CaCO<sub>3</sub>)</b>	entre 80 et 100 mg/L	Corrosion et entartrage
<b>Fer (Fe)</b>	≤ 0,3 mg/L	Goût et taches sur la lessive et les accessoires de plomberie
<b>Manganèse (Mn)</b>	≤ 0,05 mg/L	Goût et taches sur la lessive et les accessoires de plomberie
<b>Matière dissoute totale (MDT)</b>	≤ 500 mg/L	Goût et entartrage
<b>pH</b>	entre 6,5 et 8,5	Influence sur la formation des sous-produits de la désinfection et l'efficacité du traitement
<b>Sodium (Na)</b>	≤ 200 mg/L	Goût
<b>Sulfate (SO<sub>4</sub>)</b>	≤ 500 mg/L	Goût; de fortes concentrations peuvent causer des effets physiologiques comme la diarrhée et la déshydratation.
<b>Sulfure (H<sub>2</sub>S)</b>	≤ 0,05 mg/L	Goût et odeur
<b>Température</b>	≤ 15 °C	La température influe indirectement sur la santé et l'aspect par ses effets sur la désinfection, le contrôle de la corrosion et la formation de films biologiques dans le réseau de distribution.
<b>Zinc (Zn)</b>	≤ 5 mg/L	Goût; l'eau renfermant des concentrations de zinc supérieures à l'OE a tendance à être opalescente et

## à laisser une pellicule grasseuse après ébullition

Le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le potassium (K) ont aussi été analysés dans le cadre des PACES, mais ces derniers ne font l'objet d'aucun critère esthétique ou de potabilité. Ils contribuent toutefois à la matière dissoute totale, et dans le cas du calcium, à la dureté de l'eau. Dans le cas du manganèse, un lien possible entre des concentrations élevées de manganèse et une diminution du quotient intellectuel chez les enfants en bas âge a récemment été décelé (Bouchard et coll. 2011). Il est donc probable que ce paramètre devienne bientôt normé.

La grille de critères de qualité d'eau du MDDELCC présente, pour plusieurs substances, les critères établis pour l'eau de consommation (basés sur les recommandations de Santé Canada), de même que les critères s'appliquant aux situations où les eaux souterraines contaminées font résurgence dans les eaux de surface ou s'infiltrent dans les réseaux d'égout. Cette grille fournit également les limites de quantification (LQD) associées à chacune des substances. Il est à noter que les concentrations mesurées pour un échantillon donné ne sont valides que pour le puits où il a été récolté. Les valeurs des paramètres analysés peuvent aussi varier dans le temps (saisons ou années).

Pour en savoir plus :

**Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada** (Santé Canada 2012)

[En ligne : [http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/2012-sum\\_guide-res\\_recom/index-fra.php](http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/2012-sum_guide-res_recom/index-fra.php)]

**Grille de critères de qualité d'eau** (MDDELCC 2014e)

[En ligne : [http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe\\_2\\_grille\\_eaux.htm](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_grille_eaux.htm)]

**Résumé des principales obligations du Règlement sur la qualité de l'eau potable** (MDDELCC 2014d)

[En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/>]

**Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine** (INSPQ 2014)

[En ligne : <http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/198-CartableEau/>]

**Eaux souterraines – La qualité de l'eau de mon puits** (MDDELCC 2014b)

[En ligne : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/depliant/index.htm>]

**Laboratoires accrédités offrant des services spécifiques à l'analyse de l'eau potable en conformité avec la réglementation en vigueur** (CEAE 2010)

[En ligne : <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accreditation/PALA/la03.htm>]

**Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec – La qualité des nappes d'eau souterraine** (MDDELCC 2014c)

[En ligne : [http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-qualite-eau-Quelle-situation\\_NappeH2OSouterraine.htm](http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-qualite-eau-Quelle-situation_NappeH2OSouterraine.htm)]

## 8. VULNÉRABILITÉ

---

La meilleure approche pour la protection d'un aquifère à l'échelle régionale est d'utiliser des méthodes préventives à sa contamination. L'estimation de la vulnérabilité des nappes constitue un outil permettant de répondre à ce besoin. Suivant les variations de la topographie, de l'occupation du sol et de la géologie, certaines portions de l'aquifère sont naturellement mieux protégées que d'autres et sont ainsi moins vulnérables à une éventuelle contamination causée par les activités en surface.

### CONTAMINATION

L'eau souterraine peut contenir des substances nocives, qui peuvent être d'origine naturelle (exemple : dissolution de minéraux dans les terrains traversés), mais aussi de cause **anthropique** (qui provient par exemple des activités agricoles ou industrielles). Ces deux types de contamination peuvent aussi être divisées en **contamination ponctuelle** (par exemple d'une usine polluante) ou de **contamination diffuse** (par exemple des pesticides ou fertilisants répandus sur des terres agricoles). L'étendue et la géométrie du **panache de contamination** dépendent notamment du **contexte hydrogéologique**, ainsi que du temps écoulé depuis le début de l'activité polluante.

Une étude de caractérisation hydrogéologique inclut souvent la détermination des **zones de vulnérabilité** à la contamination, c'est-à-dire les zones susceptibles de permettre à des contaminants d'atteindre la nappe phréatique. La connaissance et la protection des **zones de recharge** des aquifères sont particulièrement importantes parce que c'est dans ces zones que l'eau de surface s'infiltré vers l'aquifère. La qualité de la nappe phréatique peut être compromise en cas de présence d'une source de contamination ou d'une eau de surface contaminée dans une zone de recharge. La connaissance de l'**aire d'alimentation** (ou **zone de captage**) d'un puits est également importante parce que toute l'eau dans cette zone sera tôt ou tard pompée par le puits. Si l'eau dans l'aire d'alimentation d'un puits est contaminée, l'eau pompée par le puits sera éventuellement également contaminée. C'est également le cas pour les captages en zone côtière, où le sur-pompage peut entraîner une contamination par l'intrusion des eaux salines.

*Actions envisageables en cas de contamination :*

### **Pour les puits municipaux :**

- Vérification des sources potentielles de contamination, car leur présence combinée à une vulnérabilité élevée d'un aquifère permet d'évaluer le risque réel de contamination.
- Plan de suivi de la qualité de l'eau souterraine pour les activités présentant des risques significatifs et situées dans des zones d'utilisation significative d'eau souterraine jugées vulnérables.
- Changement des pratiques pour réduire le risque relié aux activités ayant le plus de potentiel de contamination; changement de vocation ou d'affectation du territoire pour réduire la densité des activités anthropiques.
- Élimination des sources présentant un risque élevé; recherche de sources d'approvisionnement moins à risque.

### **Pour les puits privés :**

Pour protéger un puits d'une contamination, notamment par la présence de bactéries, les populations qui prennent leur eau potable à partir d'ouvrages individuels de captage devraient être sensibilisées aux pratiques suivantes :

- s'assurer que la tête de leur puits excède la surface du sol pour éviter les infiltrations d'eau de surface directement dans le puits;
- procéder à l'échantillonnage pour fins d'analyse, au moins une fois par année (coliformes et nitrates);
- procéder à la désinfection de l'ouvrage de captage au moins une fois par année;
- s'assurer que l'élément épurateur individuel est adéquat et fonctionne correctement;
- éviter la présence d'animaux domestiques à proximité du puits.

### ***L'INDICE DRASTIC***

La méthode **DRASTIC** est utilisée pour permettre une évaluation relative de la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère, soit la susceptibilité de l'eau souterraine de se voir affecter par une contamination provenant de la surface du sol. Elle est préconisée par la réglementation québécoise, telle que citée dans l'article 13 du Règlement sur la qualité de l'eau potable (Q-2, r.40) et dans l'article 53 du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (Q-2, r. 35.2) de la Loi sur la qualité de l'environnement. Une carte de vulnérabilité permet d'identifier les zones les plus vulnérables à la contamination et de fournir un outil pour aménager le territoire tout en protégeant la ressource en eau souterraine. Elle permet d'intégrer un ensemble de conditions qui contribuent à la vulnérabilité d'un aquifère, « traduisant » ainsi la connaissance hydrogéologique en un outil facilement applicable par des non-spécialistes (Figure 22). Le calcul de l'indice DRASTIC tient compte de sept paramètres physiques et hydrogéologiques, soit [1] la profondeur de l'aquifère, [2] la recharge, [3] la nature de l'aquifère, [4] le type de sol superficiel,

[5] la pente du terrain, [6] la nature de la zone vadose et [7] la conductivité hydraulique de l'aquifère.

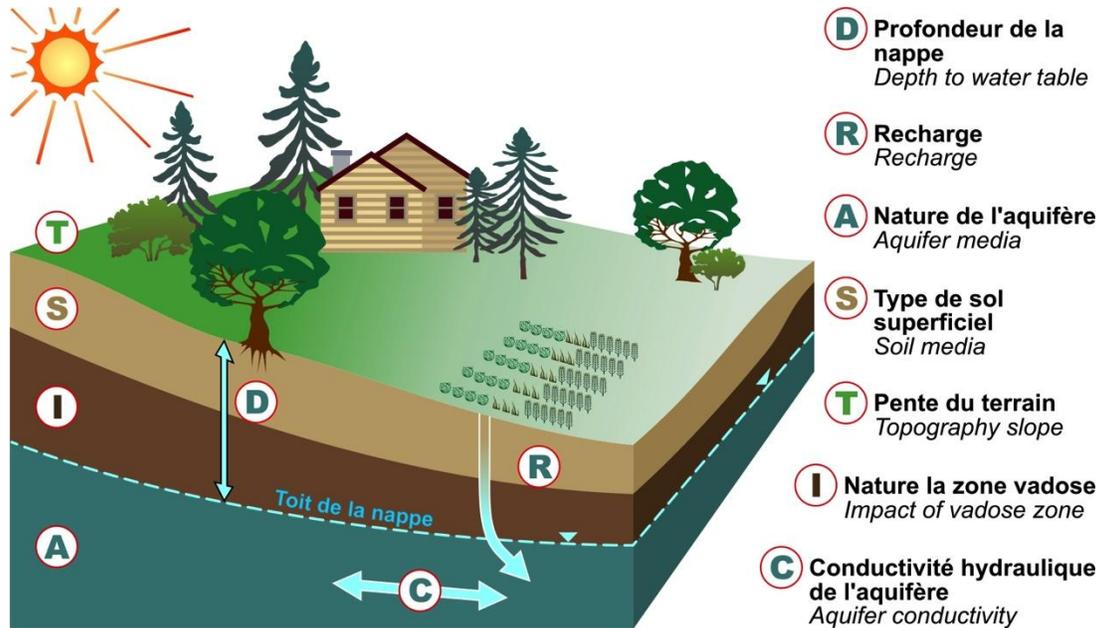


Figure 22. DRASTIC

Voici comment ces différents paramètres influencent l'indice DRASTIC:

**D** : profondeur de la nappe (**D**epth) – plus la nappe est profonde, plus l'indice est faible;

**R** : **R**echarge – plus la recharge est importante, plus l'indice est élevé;

**A** : nature de l'**A**quifère – plus l'aquifère est composé de matériel grossier donc perméable, plus l'indice est élevé;

**S** : type de **S**ol – plus le sol est composé de matériel grossier donc perméable, plus l'indice est élevé;

**T** : pente du terrain (**T**opography) – plus la pente est accentuée, plus l'indice est faible;

**I** : **I**mpact de la zone vadose – plus la zone non saturée est composée de matériel grossier, plus l'indice est élevé;

**C** : **C**onductivité hydraulique de l'aquifère – plus la conductivité hydraulique est importante, plus l'indice est élevé.

L'indice DRASTIC d'un aquifère peut varier entre 23 et 226, soit des degrés de vulnérabilité allant de très faible à très élevé, selon la classification proposée par le guide technique **Captage d'eau souterraine pour des résidences isolées** (MDDELCC 2008) :

Indice DRASTIC	Degré de vulnérabilité
moins de 85	très faible
de 85 à 114	faible
de 115 à 145	moyen
de 146 à 175	élevé plus
plus de 175	très élevé

Cette classification a toutefois été mise à jour en août 2014 dans le nouveau Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection, et se détaille maintenant comme suit :

1. «Faible»: un indice égal ou inférieur à 100 sur l'ensemble de l'aire de protection;
2. «Moyen»: un indice entre 101 et 179 sur l'ensemble de l'aire de protection;
3. «Élevé»: un indice égal ou supérieur à 180 sur une quelconque partie de l'aire de protection.

### ***DRASTIC***

*Il est aujourd'hui reconnu par la communauté des hydrogéologues que pour l'estimation de la vulnérabilité des aquifères, la méthode DRASTIC présente certaines lacunes, parfois importantes. Ce problème est extrêmement critique, car les produits cartographiques sur la vulnérabilité de la ressource sont parmi ceux qui vont s'avérer les plus utiles aux gestionnaires de l'eau.*

*La question à se poser est : peut-on considérer qu'une carte régionale de vulnérabilité basée sur les calculs de la méthode DRASTIC, tel que présentée dans les rapports PACES, peut devenir un outil décisionnel quant à la gestion et l'aménagement local du territoire? La réponse est non, car la méthode DRASTIC est appliquée dans ce rapport à l'échelle de tout le territoire régional et les résultats ne peuvent pas être utilisés à une échelle locale comme celle de l'aire d'alimentation d'un puits.*

Source : PACES – Saguenay-Lac-Saint-Jean (CERM-PACES 2013)

## **ACTIVITES POTENTIELLEMENT POLLUANTES**

L'identification et la cartographie des activités humaines présentant un danger potentiel de contamination des eaux souterraines permettent, avec l'utilisation de la carte de vulnérabilité, d'identifier les zones sensibles où des mesures particulières de prévention et de gestion doivent être mises en œuvre afin de protéger les eaux souterraines. Le potentiel de contamination de chaque activité dépend de plusieurs facteurs, dont la toxicité des contaminants rejetés, la quantité des contaminants, la superficie de la zone d'impact de l'activité et la récurrence du rejet possible dans l'environnement. Le tableau 3 présente une liste (non exhaustive) des types d'activités potentiellement polluantes pour les eaux souterraines.

**Tableau 3 : Activités potentiellement polluantes**

Assainissement et gestion des déchets
Industries des produits alimentaires
Industries chimiques
Industries du bois, pâte à papier et produits du papier
Industrie de la transformation et utilisation des métaux
Industrie électrique et électronique
Fabrication de produits minéraux non métalliques
Fabrication, réparation et maintenance du matériel de transport
Extraction des substances minérales de surface et activités minières
Production et distribution d'électricité, de produits pétroliers et de gaz
Raffinage et transformation de sous produits pétroliers
Transport, entreposage ou utilisation de produits pétroliers, chimiques ou toxiques
Réseaux de transport
Base d'entraînement militaire
Golf
Agriculture, exploitation forestière, et services connexes
Installations septiques domestiques

Les secteurs de forte densité d'activités anthropiques, mais où les eaux souterraines présentent une faible vulnérabilité, présentent un risque modéré de dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Par contre, les secteurs qui sont caractérisés à la fois par une forte densité d'activités humaine et une forte vulnérabilité des eaux souterraines présentent un risque élevé de dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Ce recoupement d'indicateurs (i.e. vulnérabilité, activités anthropiques, utilisation d'eau) permet de prioriser les secteurs les plus importants pour la protection de l'eau souterraine contre la dégradation de la qualité pouvant être causée par les activités anthropiques.

Les gouvernements du Québec et du Canada maintiennent des répertoires de sites contaminés affectant le sol et/ou l'eau souterraine et correspondant à des contaminations avérées.

Pour en savoir plus :

**Répertoire des terrains contaminés** (MDDELCC 2014f)

[En ligne : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/terrains-contamines/recherche.asp>]

**Inventaire des sites contaminés fédéraux** (SCT Canada 2014)

[En ligne : <http://www.tbs-sct.gc.ca/fcsi-rscf/home-accueil-fra.aspx>]

## 9. GESTION DE LA RESSOURCE

---

Les besoins en eau d'une population peuvent être comblés par différentes sources, selon la nature des usages, la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. Au Québec, environ 20% de la population s'alimente en eau potable à partir d'eau souterraine. Certains ont accès à un réseau alimenté par des forages municipaux, tandis qu'en milieu rural un nombre important de personnes dépendent de puits privés.

### GESTION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES

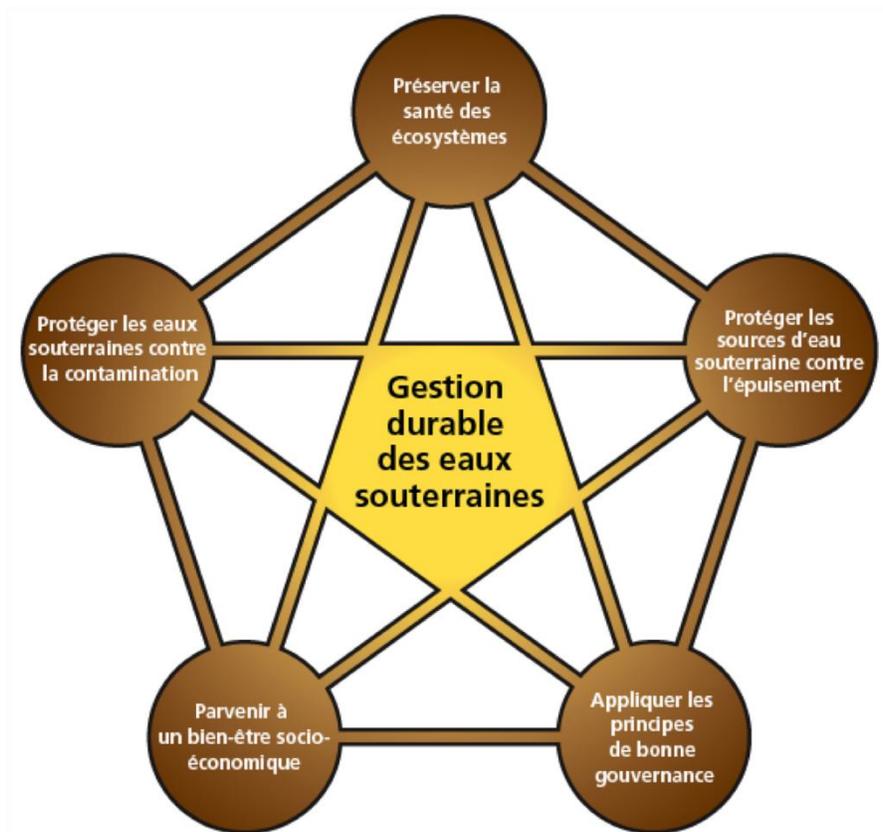
#### *Principes de gestion durable*

La gestion durable des ressources eau est basée sur le principe du développement durable selon lequel les ressources doivent être utilisées de manière à répondre aux besoins de la société tout en préservant leur pérennité à long terme. La gestion durable des ressources en eau, comme celle de tous les types de ressources, est le résultat d'un ensemble de compromis acceptés par la société.

La gestion durable des eaux souterraines doit être basée sur une connaissance adéquate des ressources disponibles. Le programme PACES joue un rôle majeur pour développer ces connaissances. Ce dernier permettra de construire une base de données fiable et complète des connaissances actuelles sur les eaux souterraines pour les régions à l'étude, où très peu de données étaient jusqu'ici disponibles. Les cartes développées ainsi que l'ensemble des travaux complémentaires réalisés dans les projets PACES procurent une compréhension des eaux

souterraines qui forme une base solide pour la gestion durable de la ressource en eau. On reconnaît généralement 5 objectifs de gestion durable (Figure 23):

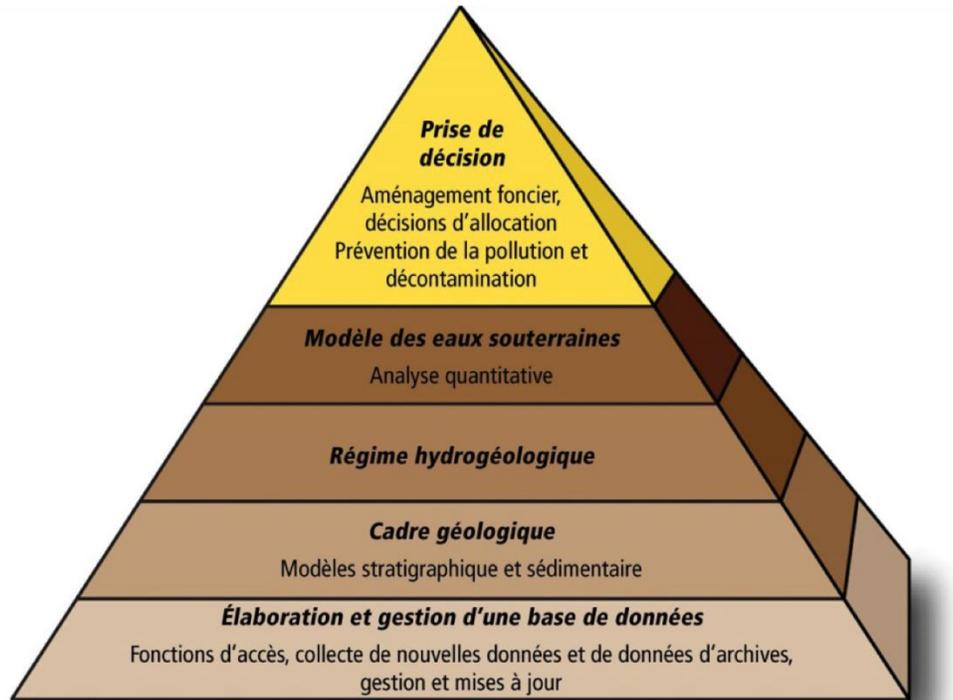
- Protéger la quantité d'eau souterraine
- Protéger la qualité de l'eau souterraine
- Préserver la santé des écosystèmes
- Assurer le bien-être socio-économique
- Appliquer les principes de bonne gouvernance



© Conseil des académies canadiennes (2009)

**Figure 23. Objectifs de gestion durable**

Le Conseil des académies canadienne (CAC 2009) propose une approche pour la gestion des eaux souterraines dans l'objectif de sa gestion durable (Figure 24). L'approche est présentée sous la forme d'une pyramide qui montre la progression à suivre, en débutant à la base pour se diriger vers le sommet. La prise de décision, au sommet de la pyramide, devrait donc reposer sur les données et connaissances acquises dans les étapes précédentes illustrées dans la pyramide.



Source : Conseil des académies canadiennes (2009)

**Figure 24. Connaissances scientifiques nécessaires pour une gestion durable des eaux souterraines**

La gestion des eaux souterraines doit maintenant être réalisée avec le support des intervenants locaux. Plusieurs ont d'ailleurs été partenaires des projets PACES, ce qui témoigne de leur grand intérêt pour la question. Pour y parvenir, ceux-ci doivent toutefois disposer d'indicateurs de quantité et de qualité qui traduisent l'état actuel de la ressource dans la région. Afin de permettre une gestion à long terme, ces indicateurs devront faire l'objet d'un suivi sur plusieurs années, voire sur des décennies. Au niveau local, des conflits d'usages pourraient toutefois survenir par rapport à une ressource limitée. C'est pourquoi les statistiques et les indicateurs des usages à l'échelle municipale donnent un aperçu initial des endroits où la gestion des usages pourrait être nécessaire pour assurer la durabilité de l'approvisionnement en eau souterraine.

Pour en savoir plus:

**La gestion durable des eaux souterraines au Canada** (CAC 2009)

[En ligne :

[http://sciencepourlepublic.ca/uploads/fr/assessments%20and%20publications%20and%20news%20releases/groundwater/\(2009-05-11\)%20gw%20rapport.pdf](http://sciencepourlepublic.ca/uploads/fr/assessments%20and%20publications%20and%20news%20releases/groundwater/(2009-05-11)%20gw%20rapport.pdf)].

## LES INDICATEURS

*Tiré des rapports PACES – Montérégie Est (Carrier et coll. 2013) et PACES – Bécancour (Larocque et coll. 2013)*

### *Indicateurs de quantité*

Les régions du Québec présentent généralement peu de déficit en eau. Dans le Québec méridional, les précipitations sont abondantes et l'évapotranspiration est limitée. Néanmoins, l'augmentation des débits pompés, qui pourraient résulter d'une intensification des activités agricoles ou industrielles, pourrait poser des contraintes sur les ressources en eau et entraîner des conflits d'usage. Une baisse des niveaux de nappe qui résulterait par exemple d'une diminution de la recharge en raison de l'imperméabilisation des surfaces, des changements climatiques, ou de la perte de milieux humides pourrait avoir pour effet de réduire les écoulements souterrains qui ont lieu dans la zone superficielle de l'aquifère. Ceci pourrait avoir un impact global sur le cycle de l'eau dans l'ensemble d'une région, notamment par l'augmentation du ruissellement de surface et la diminution du débit de base des cours d'eau. Les effets de tels changements pourraient être de réduire les volumes d'eau souterraine disponibles pour les municipalités, d'altérer la qualité de l'eau en rivière et de modifier les écosystèmes de la région.

Pour assurer le maintien des conditions actuelles qui sont assez avantageuses pour ce qui est de la quantité d'eau disponible, une gestion durable de la ressource en eau doit être mise en place. Une telle gestion implique le suivi d'indicateurs de quantité. Ceux-ci doivent refléter la connaissance des flux actuels et être susceptibles de mettre en évidence des changements dans les quantités d'eau disponibles ou dans la nature des flux rencontrés.

En général, l'exploitation de l'eau souterraine est dite soutenable si le rapport entre l'utilisation de l'eau et la recharge ne dépasse pas 10%. Afin de pouvoir identifier les mesures adéquates qui garantiront une exploitation durable des ressources en eau souterraine, il est essentiel de connaître la répartition des différentes quantités d'eau prélevées :

- Le prélèvement total annuel d'eau sur le territoire ;
- La répartition des prélèvements annuels par type de source ;
- La répartition des prélèvements annuels par type d'usage: résidentiel, agricole et industriel, commercial et institutionnel ;
- Les prélèvements annuels d'eau souterraine et d'eau de surface pour fins de distribution en réseau versus hors réseau ;
- L'eau consommée annuellement par type d'usage, en réseau ou hors réseau; il est rare que le milieu agricole consomme principalement en réseau, mais cette situation peut se

produire lorsqu'il n'y a pas d'aquifères permettant l'alimentation en eau de qualité et en quantité suffisante;

- Les plus grands préleveurs d'eau souterraine et d'eau de surface (et les quantités prélevées).

Le Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec mis en place par le MDDELCC est un moyen important pour assurer le suivi du niveau d'eau dans les aquifères et une source d'information cruciale pour les régions. L'extension du réseau à travers le Québec dans le cadre des projets PACES est certainement un atout pour les gestionnaires du territoire. Toutefois, en raison des fluctuations intra et interannuelles naturelles de la recharge, les données acquises par ces piézomètres ne seront pleinement utiles pour détecter des tendances que dans une ou deux décennies. Récemment, le MDDELCC a publié un rapport sur l'état de l'eau et des systèmes aquatiques au Québec, dans lequel on retrouve un chapitre sur l'état de la quantité des nappes d'eau souterraine (MDDELCC 2014c).

Le réseau existant de stations de mesure des débits en rivière, opéré par le CEHQ, est un autre outil important pour suivre les flux d'eau souterraine (CEHQ 2014). Dans le Québec méridional, les débits en rivière intègrent en général une proportion importante d'écoulements souterrains et hypodermiques. Le suivi des débits, particulièrement en période d'étiage, est donc un outil important pour indiquer les quantités d'eaux souterraines qui s'écoulent dans la portion la plus dynamique de l'aquifère.

Les milieux humides occupent une superficie importante au Québec. Les tourbières peuvent avoir des échanges non négligeables avec l'aquifère. De par leur rôle tampon, ces milieux humides ralentissent les écoulements, favorisent le maintien des débits d'étiage en rivière, contribuent à maintenir des niveaux élevés dans les aquifères granulaires superficiels et participent probablement à la recharge de l'aquifère rocheux sous-jacent. Le nombre et l'état des tourbières sont donc des bons indicateurs de la quantité d'eau qui est stockée dans les réservoirs superficiels. Leur suivi est important pour la gestion durable de l'eau des bassins versants.

## ***ACTIONS ENVISAGEABLES POUR LES PROBLÈMES DE QUANTITÉ***

- *Mettre en place un programme d'économie d'eau;*
- *Développer un règlement spécifiant les usages prioritaires pour éviter les conflits d'usage;*
- *Faire un suivi périodique des niveaux d'eau pour les zones de forte utilisation (ex. : secteurs avec puits municipaux ou secteurs à forte densité de puits résidentiels);*
- *Définir des zones de conservation ou à protéger;*
- *Rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement.*

### ***Indicateurs de qualité***

Afin d'assurer une eau souterraine de qualité, la gestion durable de la ressource en eau doit néanmoins inclure le suivi d'indicateurs de qualité. Un suivi régulier de la qualité de l'eau dans les forages du Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec permettrait d'identifier l'émergence de nouvelles problématiques liées à la qualité de la ressource. Une telle couverture de la qualité de l'eau ne serait pas représentative de l'ensemble du territoire dû au nombre limité de stations suivies.

Les concentrations en nitrates dans les eaux souterraines font souvent partie des problématiques qui doivent être suivies plus particulièrement. Les activités agricoles en sont probablement responsables en grande partie. Il est donc particulièrement important d'assurer un suivi des concentrations en nitrates, mais également d'évaluer la situation pour d'autres contaminants d'origine agricole (i.e. pesticides, bactéries) qui pourraient migrer des mêmes sources agricoles vers l'aquifère.

Le recoupement de la vulnérabilité, de la densité des activités anthropiques et de l'usage de l'eau (c.à.d. la proportion d'eau souterraine utilisée comme source d'eau potable) constituent aussi un indicateur de qualité ou de dégradation potentielle. Par exemple, un secteur à forte densité de puits résidentiels, combiné avec un indice DRASTIC élevé et une forte densité d'activités potentiellement polluantes indique un potentiel élevé de dégradation de la qualité de l'eau souterraine.

## ***ACTIONS ENVISAGEABLES POUR LES PROBLÈMES DE QUALITÉ***

- *Analyse des paramètres chimiques susceptibles de présenter des dépassements de qualité, de façon à identifier les puits résidentiels ou municipaux affectés;*
- *Traitement de l'eau souterraine et utilisation de systèmes de traitement de l'eau appropriés pour les cas avérés de dépassements des critères de potabilité;*
- *Élimination de la source de contamination;*
- *Suivi périodique de qualité pour les secteurs à forte densité de puits privés où des problématiques anthropiques ont été identifiées;*
- *Recherche de nouvelles sources d'approvisionnement.*

Toutes ces actions sont relativement coûteuses, mais la prévention de la dégradation représente, de manière générale, une approche beaucoup plus efficace et économique que la restauration d'un aquifère contaminé.

## ***USAGES ET PRESSIONS***

### ***Les principaux usages***

Au Canada, l'utilisation prédominante de l'eau souterraine varie selon la province. En Ontario, à l'Île-du-Prince-Édouard, au Nouveau-Brunswick et au Yukon, les plus gros utilisateurs de l'eau souterraine sont les municipalités; en Alberta, en Saskatchewan et au Manitoba, c'est l'industrie agricole pour l'abreuvement du bétail; en Colombie-Britannique, au Québec et dans les Territoires du Nord-Ouest, c'est l'industrie; et à Terre-Neuve et en Nouvelle-Écosse, c'est l'utilisation domestique rurale. L'Île-du-Prince-Édouard est presque totalement tributaire de l'eau souterraine pour toutes ses utilisations (Environnement Canada 2013b).

### **La consommation d'eau potable**

Les besoins en eau d'une population peuvent être comblés par différentes sources, selon la nature des usages, ainsi que la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. Au Québec, entre 20 et 25% de la population s'alimente à partir d'eau souterraine, ce qui correspond à près de 1,5 millions de personnes. De plus, 80% de la population habitant en région rurale dépend entièrement de l'eau souterraine comme source d'eau potable.

### Le secteur agricole

En 2000, l'eau souterraine prélevée et utilisée pour l'irrigation et l'élevage dans le secteur agricole au Québec a été estimée à 16 % alors que l'aquaculture a utilisé 23 % du total prélevé (BAPE 2000). Le climat québécois favorise une faible utilisation de l'eau pour l'irrigation, l'essentiel servant à l'élevage. En effet, en 2007, seulement 8 millions m<sup>3</sup> d'eau (surface et souterraine confondue) a été utilisé pour l'irrigation au Québec, contre 1,1 milliard m<sup>3</sup> en Alberta (Statistique Canada 2009). Le projet PACES de la région de Bécancour, dans le Centre-du-Québec, a aussi révélé une utilisation importante de l'eau souterraine pour la production de la canneberge.

### Les besoins industriels, commerciaux et institutionnels

Diverses industries consomment de grandes quantités d'eau pour la production de biens et services, comme c'est le cas de l'industrie des pâtes et papiers, du pétrole, des mines, de la métallurgie, de la chimie et de l'eau embouteillée.

Les projets PACES ont permis de faire l'inventaire des prélèvements en eau souterraine pour chacune des régions couvertes. Le graphique suivant résume la consommation en eau souterraine pour les secteurs résidentiels, industriels, commerciaux et institutionnels, et agricole, dont les proportions varient grandement selon les régions (Figure 25).

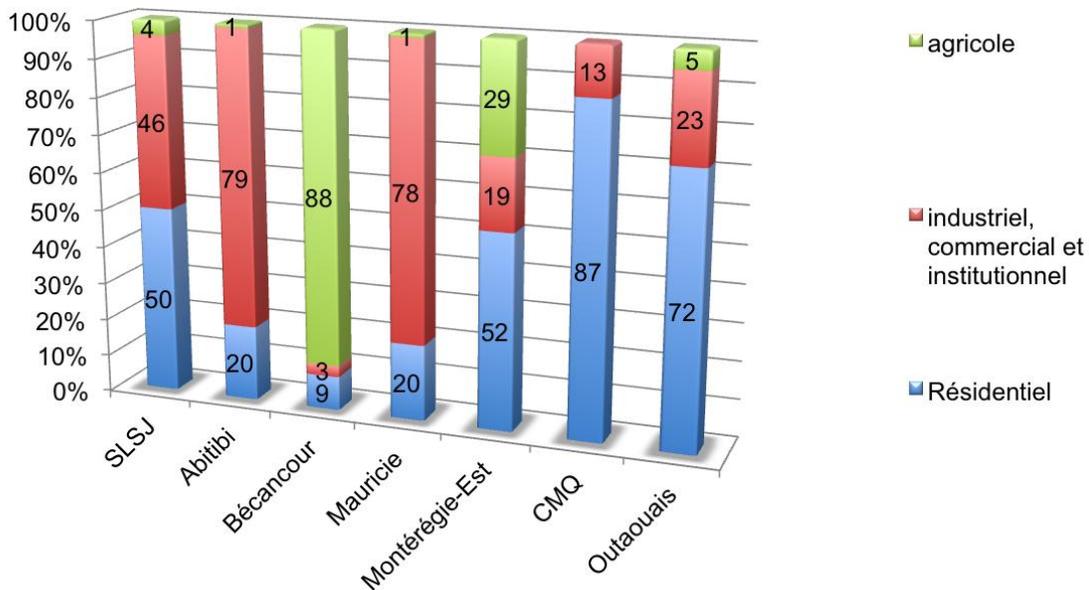


Figure 25. Consommation en eau souterraine par secteur

\*SLSJ: Saguenay-Lac-St-Jean

CMQ: Communauté métropolitaine de Québec (remarque: les données pour le secteur agricole de cette région ne sont pas disponibles)

Sources : PACES – Saguenay-Lac-Saint-Jean (CERM-PACES 2013), PACES – Abitibi-Témiscamingue (Partie 1) (Cloutier et coll. 2013), PACES – Bécancour (Larocque et coll. 2013), PACES – Mauricie (Leblanc et coll. 2013), PACES – Montérégie Est (Carrier et coll. 2013), PACES – CMQ (Talbot Poulin et coll. 2013) et PACES – Outaouais (Comeau et coll. 2013)

### ***La géothermie***

Le chauffage et la climatisation par géothermie est une pratique relativement récente au Québec. Typiquement, ce type de système utilise un nombre variable de puits de 150 à 200 mètres de profondeur à l'intérieur desquels une conduite décrit une boucle de la surface jusqu'au fond. Un fluide caloporteur circule dans cette conduite et soutire l'énergie thermique naturelle du sous-sol par conductance thermique. D'autres systèmes utilisent des puits à partir desquels l'eau souterraine est pompée, dirigée dans un échangeur thermique, puis retournée à l'aquifère via d'autres puits. Compte tenu de la température relativement élevée des eaux souterraines dans le sud du Québec, du fort potentiel aquifère de plusieurs régions et du caractère inépuisable de la géothermie, il est probable que l'exploitation de cette ressource connaisse un essor dans le futur. L'hôpital Cooke et le Technoparc, à Trois-Rivières, ainsi que le pavillon d'Amos de l'UQAT, sont quelques exemples de bâtiments qui se sont dotés d'un système géothermique.

### ***Les pressions***

Les ressources en eau sont exposées à un ensemble de pressions parmi lesquelles certaines concernent plus spécifiquement les eaux souterraines. La liste suivante présente des exemples, mais elle ne se veut pas exhaustive.

- Augmentation des prélèvements d'eau souterraine pour divers usages, dont l'alimentation en eau potable, l'agriculture ou l'industrie.
- Contamination à partir des eaux usées domestiques, tant les systèmes septiques des résidences individuelles que les fuites des réseaux d'égout municipaux.
- Augmentation de la pollution d'origine diffuse par l'intensification des pratiques agricoles.
- Pollutions ponctuelles accidentelles et prolongées, e.g. déversements de liquides toxiques, lixiviation de sites d'élimination de déchets, fuites de réservoirs d'hydrocarbure.
- Nouvelles activités ayant un potentiel de contamination de l'eau souterraine encore mal quantifié (e.g. exploitation des gaz de shales);
- Changements dans la dynamique de la recharge entraînée par les changements climatiques ou par l'urbanisation.

## LEGISLATION ET GOUVERNANCE

En ce qui concerne la bonne gouvernance de l'eau souterraine, la responsabilité est partagée entre les niveaux locaux, régionaux et provinciaux. Jusqu'à récemment, la faible connaissance sur l'eau souterraine ne permettait pas de considérer la gestion des ressources en eau souterraine dans la planification du développement régional durable. Les projets PACES créent des opportunités pour des campagnes de sensibilisation et d'éducation sur cette ressource, pour le développement d'outils d'aide à la décision visant sa gestion, et pour plus grande collaboration entre chercheurs, gestionnaires et usagers. La concertation régionale des organismes intéressés à la gouvernance ou à la gestion de la ressource peut aussi assurer une cohérence dans les approches et les critères d'actions visant à assurer une bonne gouvernance de la ressource. Il est important de s'assurer que l'information et les outils requis pour des politiques publiques basées sur des données probantes circulent librement entre les chercheurs, les gestionnaires du territoire et de la ressource, les élus et les citoyens.

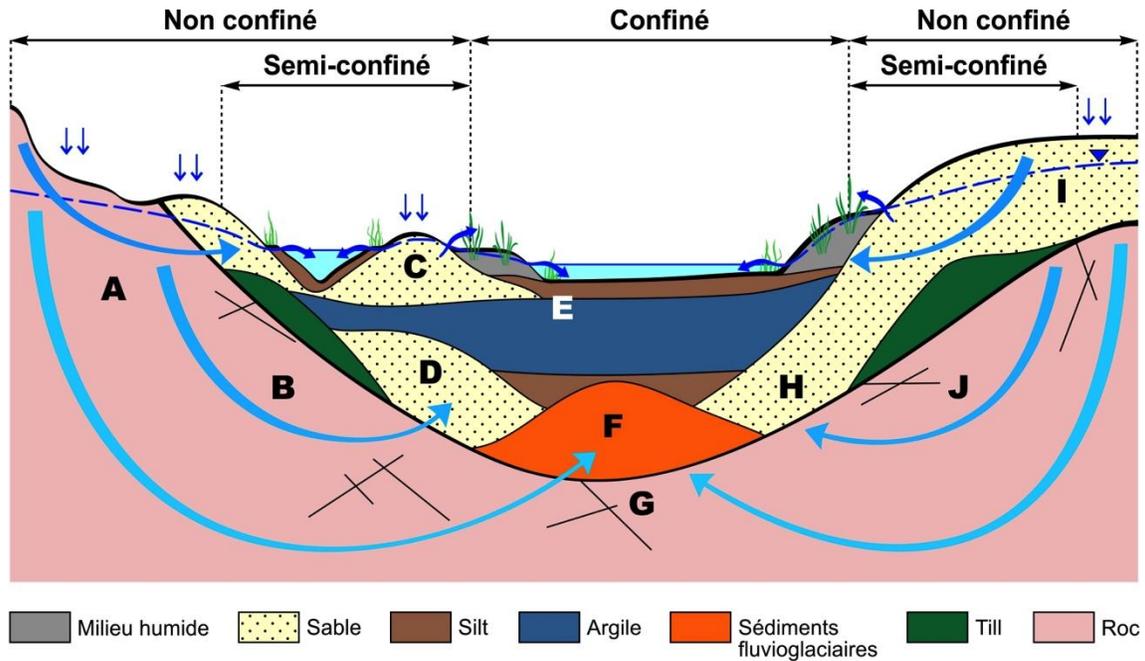
Source : PACES – Montérégie-Est (Carrier et coll. 2013)

### Règlementation appliquée aux eaux souterraines

- Règlement sur le captage des eaux souterraines (RCES)\*  
[En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/guide-tech.htm>]
- Règlement sur la qualité de l'eau potable :  
[En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/index.htm>]
- Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP):  
[En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/prelevements/reglement-prelevement-protection/index.htm>]

\* Le RPEP remplace le Règlement sur le captage des eaux souterraines depuis le 14 août 2014. Toutefois, les dispositions du chapitre II du RCES, qui sont remplacées par celles des articles 11 à 30 du RPEP, demeurent en vigueur jusqu'au 2 mars 2015.

## 10. SYNTHÈSE



	Confinement	Écoulement	Recharge	Vulnérabilité	Géochimie
<b>A</b>	Non confiné	Local	Modérée à élevée	Modérée à élevée	Météorique
<b>B</b>	Semi-confiné	Intermédiaire	Modérée	Modérée	Intermédiaire
<b>C</b>	Non confiné	Local	Élevée	Élevée	Météorique
<b>D</b>	Semi-confiné	Intermédiaire	Modérée	Modérée	Intermédiaire
<b>E</b>	Aquitard	Négligeable	Nulle	Négligeable	Saline
<b>F</b>	Confiné	Régional	Faible	Faible	Intermédiaire
<b>G</b>	Confiné	Régional	Faible	Faible	Saline
<b>H</b>	Confiné	Intermédiaire	Modérée	Modérée	Intermédiaire
<b>I</b>	Non confiné	Local	Élevée	Élevée	Météorique
<b>J</b>	Semi-confiné	Intermédiaire	Modérée	Modérée	Intermédiaire

Figure 26. Synthèse

## 11. BIBLIOGRAPHIE

---

BAPE (2000). L'eau, ressource à protéger, à partager et à mettre en valeur. Rapport de la Commission sur la gestion de l'eau au Québec, Bureau d'audiences publiques sur l'environnement. No 142, Tome I. 478 p. [En ligne : <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/archives/eau/>]

Bouchard M.F., Sauvé S., Barbeau B., Legrand M., Brodeur M.E., Bouffard T., Limoges E., Bellinger D.C. et Mergler, D. (2011). Intellectual impairment in school-age children exposed to manganese from drinking water. *Environmental Health Perspectives*, 119(1):138-43. [En ligne : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3018493/pdf/ehp-119-138.pdf>]

Bourque, P.-A. (1997-2004). Planète Terre. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval. [En ligne : [http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html)]

CAC (2009). La gestion durable des eaux souterraines au Canada. Comité d'expert sur les eaux souterraines, Conseil des académies canadiennes, Ottawa, Canada, 292 p. [En ligne : [http://sciencepourlepublic.ca/uploads/fr/assessments%20and%20publications%20and%20news%20releases/groundwater/\(2009-05-11\)%20gw%20rapport.pdf](http://sciencepourlepublic.ca/uploads/fr/assessments%20and%20publications%20and%20news%20releases/groundwater/(2009-05-11)%20gw%20rapport.pdf)]

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. [En ligne : <http://espace.inrs.ca/1639/1/R001433.pdf>]

CEAE (2010). Laboratoires accrédités offrant des services spécifiques à l'analyse de l'eau potable en conformité avec la réglementation en vigueur. Centre d'expertise en analyse environnementale, Gouvernement du Québec. [En ligne : <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accreditation/PALA/lla03.htm>]

CEHQ (2014). Le réseau hydrométrique québécois. Centre d'expertise hydrique du Québec, Gouvernement du Québec. [En ligne : <http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/reseau/>]

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. [En ligne : [http://rqes-gries.ca/upload/files/Rapports/PACES-1/Rap\\_scienti\\_SLSJ\\_leger.pdf](http://rqes-gries.ca/upload/files/Rapports/PACES-1/Rap_scienti_SLSJ_leger.pdf)]

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). [En ligne : [http://gres.uqat.ca/RadFiles/PACES-AT1\\_Rapport\\_Final\\_GRES-UQAT-P001.pdf](http://gres.uqat.ca/RadFiles/PACES-AT1_Rapport_Final_GRES-UQAT-P001.pdf)]

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. [En ligne : [http://www.latin.gc.ca/projets/PACES\\_Outouais\\_RapFinal\\_Scientifique\\_20131219.pdf](http://www.latin.gc.ca/projets/PACES_Outouais_RapFinal_Scientifique_20131219.pdf)]

Crowe, A.S., Schaefer, K.A., Kohut, A., Shikaze, S.G., Ptacek, C.J. (2003). Science de l'eau et politiques: Qualité des eaux souterraines. Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME), Winnipeg (Manitoba). Série d'ateliers du CCME : science de l'eau et politiques. Rapport no 2. 56 p. [En ligne : [https://www.ec.gc.ca/inre-nwri/795D939F-E681-4A71-9E7B-EBECFCCB701C/2002\\_grndwtrqlty\\_wkshp\\_f.pdf](https://www.ec.gc.ca/inre-nwri/795D939F-E681-4A71-9E7B-EBECFCCB701C/2002_grndwtrqlty_wkshp_f.pdf)]

Dubois, J.M. n° 91-04-33, Îles-de-la-Madeleine (Québec) [En ligne : <http://www.geobase.ca/geobase/fr/data/imagery/guide/dune/pg07.html;jsessionid=1D4511C4F84DBDD15BC3A07E6927E865>]

Environnement Canada (2013a). Le cycle hydrologique. Gouvernement du Canada. [En ligne : <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=23CEC266-1>]

Environnement Canada (2013b). Les eaux souterraines. Gouvernement du Canada. [En ligne : <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=300688DC-1>]

INSPQ (2014). Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine. Institut national de santé publique, Gouvernement du Québec. [En ligne : <http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/198-CartableEau/>]

Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L., Meyzonat, 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. [En ligne : [http://www.grobec.org/hydrogeo/pdf/Rapport\\_synthese\\_PACES\\_Becancour\\_2013.pdf](http://www.grobec.org/hydrogeo/pdf/Rapport_synthese_PACES_Becancour_2013.pdf)]

Limper Geology Museum (2010). Local Geology – Glacial till. [En ligne : <http://www.cas.miamioh.edu/glg/museum/students/till.html>]

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). [En ligne : [http://rques-gries.ca/upload/files/Rapports/PACES-1/MAUR\\_Rap\\_Vulgarise\\_28juin.pdf](http://rques-gries.ca/upload/files/Rapports/PACES-1/MAUR_Rap_Vulgarise_28juin.pdf)]

MDDELCC (2001). Le cycle de l'eau souterraine. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec. [En ligne : [http://www.mddefp.gouv.qc.ca/jeunesse/chronique/2001/0110\\_campagne.htm](http://www.mddefp.gouv.qc.ca/jeunesse/chronique/2001/0110_campagne.htm)]

MDDELCC (2008). Guide technique Captage d'eau souterraine pour des résidences isolées. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec. [En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/guide.pdf>]

MDDELCC (2012). Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec. [En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>]

MDDELCC (2014a). Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec. [En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/piezo/>]

MDDELCC (2014b). Eaux souterraines. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec. [En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/index.htm>]

MDDELCC (2014c). Rapport sur l'état de l'eau et des systèmes aquatiques du Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec. [En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/index.htm>]

MDDELCC (2014d). Résumé des principales obligations du Règlement sur la qualité de l'eau potable. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec. [En ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/>]

MDDELCC (2014e). Grille des critères applicables aux cas de contamination des eaux souterraines. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec. [En ligne : [http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe\\_2\\_grille\\_eaux.htm](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_grille_eaux.htm)]

MDDELCC (2014f). Répertoire des terrains contaminés. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec. [En ligne : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/terrains-contamines/recherche.asp>]

Santé Canada (2012). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada. Préparé par le Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement, Gouvernement du Canada [En ligne : [http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/2012-sum\\_guide-res\\_recom/index-fra.php](http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/2012-sum_guide-res_recom/index-fra.php)]

SCT Canada (2014). Inventaire des sites contaminés fédéraux. Secrétariat du conseil du trésor du Canada, Gouvernement du Canada. [En ligne : <http://www.tbs-sct.gc.ca/fcsi-rscf/home-accueil-fra.aspx>]

Société de l'eau souterraine de l'Abitibi-Témiscamingue (SESAT) (2013). *Portrait de l'esker aquifère Saint-Mathieu-Berry*, 277 p. [En ligne : [http://sesat.ca/RadDocuments/Portrait%20final\\_avec%20cartes.pdf](http://sesat.ca/RadDocuments/Portrait%20final_avec%20cartes.pdf)]

Statistique Canada (2009). Enquête sur l'utilisation agricole de l'eau 2007, rapport méthodologique, Série de documents analytiques et techniques sur les comptes et la statistique de l'environnement, n° 16-001-M2009008 au catalogue. [En ligne : <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-002-x/2009003/article/10927-fra.htm>]

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. [En ligne : [http://www.cmquebec.qc.ca/presse/documents/CMQ\\_Rap\\_Scienti.pdf](http://www.cmquebec.qc.ca/presse/documents/CMQ_Rap_Scienti.pdf)]

UNESCO-WWAP (2006). *Water : A Shared Responsibility*, The United Nations World Water Development Report 2. Publié par United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization et Berghahn Books, 584 p. [En ligne : <http://www.unesco.org/bpi/wwap/press/>]