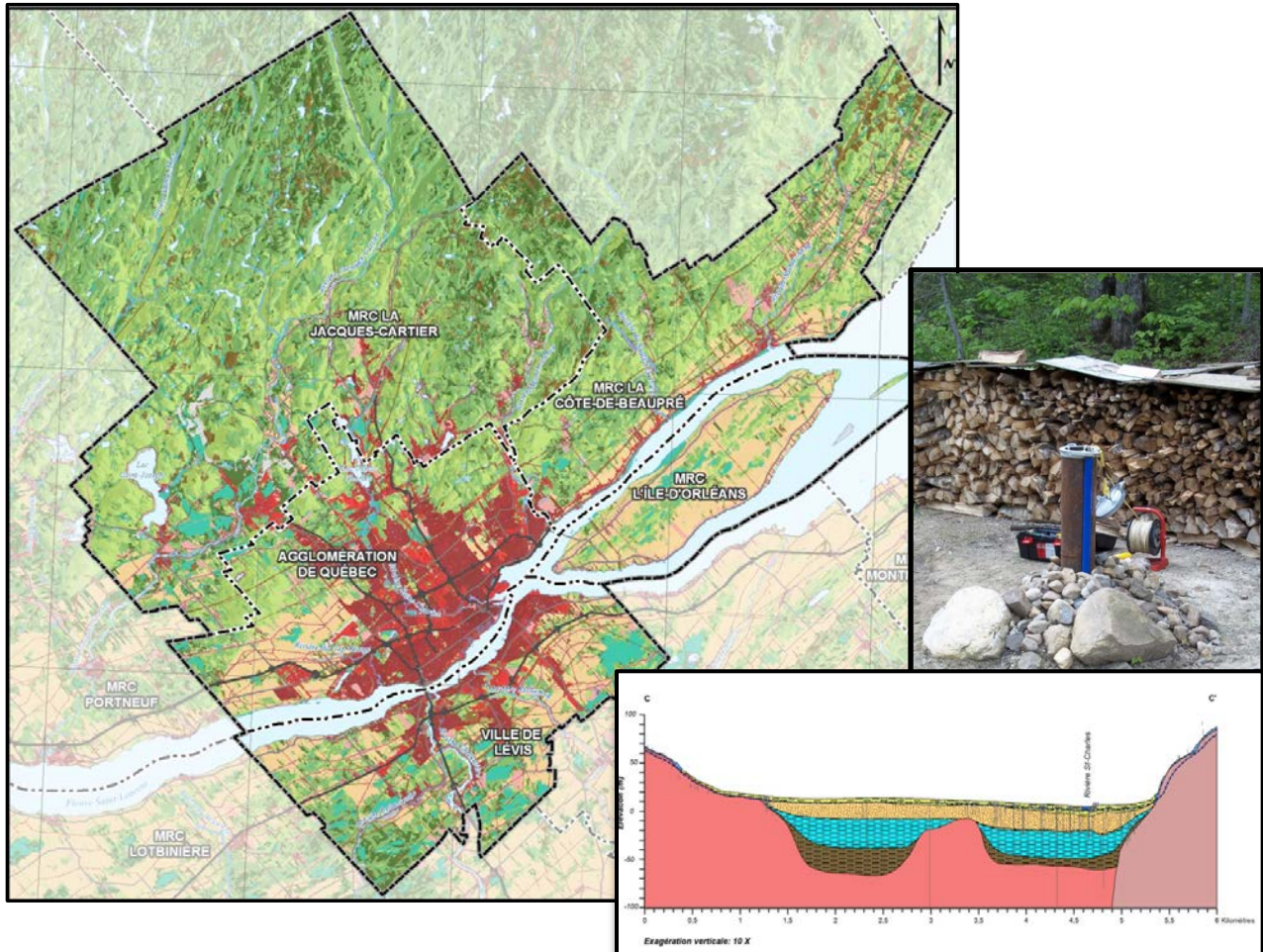


Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines sur le territoire de la
Communauté métropolitaine de Québec
(PACES-CMQ)

RAPPORT VULGARISÉ

Soumis par le Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval
au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
(MDDEFP) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux
souterraines du Québec (PACES)



31 mars 2013

Le projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (PACES-CMQ) a été réalisé par l'Université Laval pour le ministère du Développement durable de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MMDEFP) et avec la collaboration de plusieurs partenaires dont la CMQ, les organismes de bassins versants, les municipalités régionales de comté (MRC), les villes et les municipalités. Le projet a pour objectif principal de dresser le portrait régional de la ressource en eau souterraine afin d'assurer sa gestion durable et sa protection. Les livrables présentés dans ce document correspondent aux thèmes imposés par le MDDEFP dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines dans lequel s'inscrit ce projet. Ce rapport présente de façon vulgarisée les différents livrables qui ont été réalisés dans le cadre du projet. Ces livrables concernent différents éléments du territoire ainsi que les nouvelles connaissances acquises sur la ressource en eau souterraine dans le cadre de ce projet.

Les résultats de cette étude proviennent d'une analyse à partir de données comportant différents niveaux de détails et avec une couverture non uniforme sur tout le territoire. Les résultats montrent donc une vue d'ensemble des contextes hydrogéologiques et ne peuvent être appliqués pour résoudre des problèmes à l'échelle locale.

Livable PACES #1 : Topographie

À l'échelle régionale, la topographie influence le climat, les directions d'écoulement des eaux souterraines et les zones de réalimentation (recharge) des aquifères. L'écoulement souterrain régional se fait généralement des hauts topographiques, qui sont souvent des zones de recharge des aquifères, vers les bas topographiques. Le livrable PACES #3 montrant le modèle numérique de terrain consiste en un autre mode de présentation de la topographie.

Modelée par les grandes glaciations du Quaternaire, la topographie du territoire de la CMQ est caractérisée par des paysages et des ensembles physiographiques variés. La partie septentrionale de la rive nord du Fleuve Saint-Laurent affiche une physiographie typique des Laurentides (ou hautes terres) faisant partie du Bouclier canadien. Le relief y est composé de collines et de montagnes plus ou moins abruptes culminant à 1 020 m d'altitude, entrecoupées de vallées orientées nord-sud aux pentes parfois escarpées. Ces vallées s'ouvrent vers le sud sur un paysage caractéristique de l'ensemble physiographique des Basses-terres du Saint-Laurent, composé de plaines, de terrasses et de collines allongées d'est en ouest. Sur le territoire de la CMQ, ce paysage des Basses-terres du Saint-Laurent est représentatif de la portion méridionale de la rive nord du fleuve, de la rive sud et de l'île d'Orléans. L'altitude dans les Basses-terres du Saint-Laurent oscille environ entre 150 m et 0 m. Des escarpements pouvant atteindre plus de 100 m de dénivelé se retrouvent aussi en bordure du fleuve.

Livrable PACES #2 : Routes et limites administratives

La carte du réseau routier et des limites administratives permet de localiser les données acquises sur l'eau souterraine et les points d'intérêt avoisinants. L'indication du nom des lieux, routes et municipalités facilite d'autant plus cette localisation. La carte montre les autoroutes, les routes principales, secondaires et tertiaires, ainsi que les voies ferrées. Les limites de la CMQ, des MRC, des municipalités, des villes et de leurs arrondissements sont également illustrées.

La région d'étude partagée entre les régions administratives de la Capitale-Nationale (03) et de Chaudière-Appalaches (12) correspond au territoire municipalisé de la Communauté métropolitaine de Québec et couvre une superficie de 3 663 km². Elle comprend 28 municipalités réparties dans les municipalités régionales de comté (MRC) de La Jacques-Cartier, de La Côte-de-Beaupré et de L'Île-d'Orléans ainsi que dans l'Agglomération de Québec et la Ville de Lévis. Sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, cette région est entourée par les MRC de Charlevoix à l'est, de Portneuf à l'ouest, puis du Lac-Saint-Jean-Est et du Fjord-du-Saguenay au nord. Sur la rive sud, la région d'étude est ceinturée à l'ouest par la MRC de Lotbinière, à l'est par la MRC de Montmagny et au sud par les MRC de La Nouvelle-Beauce et de Bellechasse. Le territoire de la CMQ compte actuellement plus de 5 500 km de voies carrossables, dont 125 km d'autoroute et trois ponts majeurs : le pont Pierre-Laporte, le pont de Québec et le pont de l'île d'Orléans.

Livrable PACES #3 : Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain correspond à l'élévation de la surface du sol par rapport au niveau moyen de la mer sur un maillage régulier de cellules dont la dimension est de 10 m par 10 m. Le modèle numérique de terrain constitue une autre forme de représentation de la surface du terrain et est donc comparable à la topographie (Livrable PACES #1). L'utilisation d'une échelle de couleur correspondant à la plage complète d'élévations permet de visualiser plus facilement les variations de la topographie. Le texte associé au livrable PACES #1 décrit la topographie de la région d'étude.

Livrable PACES #4 : Pente

La pente représente le degré d'inclinaison de la surface du sol par rapport à l'horizontale. Les pentes montrées par le livrable PACES #4 ont été calculées sur un maillage régulier de 10 m par 10 m à partir du modèle numérique de terrain (Livrable PACES #3). La pente du sol influence le ruissellement des précipitations ainsi que le drainage des sols et la recharge des aquifères. En effet, plus la pente est forte, plus il y aura de ruissellement à la surface du sol et moins il y aura d'infiltration d'eau dans le sol pour réalimenter les aquifères. Le texte associé au livrable PACES #1 décrit, en plus de la topographie, la pente de la région d'étude.

Livrable PACES #5 : Hydrographie

La carte hydrographique représente la distribution spatiale des cours d'eau (ruisseaux, rivières et fleuve) et des plans d'eau (lacs) présents sur le territoire. Les cours d'eau et les plans d'eau de surface correspondent habituellement à des zones d'échange entre les eaux de surface et les souterraines. À ces endroits, l'eau souterraine peut s'écouler vers les eaux de surface et ainsi les réalimenter, ou l'écoulement peut être en direction inverse, des eaux de surface vers les eaux souterraines. Au Québec, ce sont habituellement les eaux souterraines qui vont alimenter les cours d'eau et les plans d'eau, et non le contraire. La résurgence des eaux souterraines dans les cours d'eau assure un débit de base qui permet à certains cours d'eau d'être pérennes, même lors de la saison hivernale.

Les principaux cours d'eau traversant le territoire d'étude sont les rivières Jacques-Cartier, Montmorency, Saint-Charles, Sainte-Anne (La Pérade) et Sainte-Anne-du-Nord sur la rive nord ainsi que les rivières Chaudière, Etchemin et à la Scie sur la rive sud. Dans les Laurentides, les cours d'eau sont généralement rectilignes et ils s'écoulent sur le socle rocheux, alors que dans les plaines alluviales des Basses-Terres du Saint-Laurent, les cours d'eau forment des méandres dans les dépôts meubles. Plusieurs cours d'eau intermittents influencés par le drainage agricole ou urbain ont une forme rectiligne.

Livrable PACES #6 : Bassins versants

Un bassin versant est un territoire délimité par les élévations du terrain à l'intérieur duquel l'eau s'écoule vers le même exutoire. Cette délimitation du territoire permet une gestion intégrée de l'eau de surface et de l'eau souterraine, telle que visée par les organismes de bassins versants.

Quatorze bassins versants de plus de 25 km² recourent la CMQ et sont représentés sur la carte du livrable PACES #6. Leur exutoire se situe au niveau du fleuve Saint-Laurent. En termes de superficie, les principaux bassins versants de la CMQ sont ceux de la rivière Jacques-Cartier, Saint-Charles, Sainte-Anne et Montmorency.

Livrable PACES #7 : Occupation du sol

La carte d'occupation du sol montre les usages qui sont faits de la surface du territoire. Une connaissance de l'occupation du sol est utile pour cibler les secteurs où les activités sont susceptibles d'exercer une pression sur la ressource en eaux souterraines et d'en modifier la qualité ou la quantité. L'occupation du sol influence aussi le cycle de l'eau. Par exemple, en zone urbaine dense, le ruissellement de l'eau à la surface du terrain est généralement plus élevé qu'en région rurale. En zone de couvert forestier, l'évapotranspiration des plantes sera beaucoup plus importante qu'en région urbaine.

Dans la région de la CMQ, les milieux urbanisés les plus denses se trouvent dans l'Agglomération de Québec et dans la Ville de Lévis. Le milieu urbanisé recouvre environ 11 % du territoire alors que 61 % du territoire est en couvert forestier, principalement dans les MRC de La Jacques-Cartier et de La Côte-de-Beaupré. L'agriculture couvre 9 % du territoire et se retrouve surtout à l'île d'Orléans et dans la Ville de Lévis. Les plans d'eau et les milieux humides représentent respectivement 9 % et 4 % du territoire.

Livrable PACES #8 : Couverture végétale

La carte de la couverture végétale montre l'ensemble des végétaux qui recouvrent le sol. Ces derniers jouent un rôle significatif sur le cycle de l'eau en retournant une portion des précipitations vers l'atmosphère par évapotranspiration. Une part des précipitations est interceptée par le feuillage des plantes et est directement évaporée vers l'atmosphère. Aussi, les végétaux retirent une partie de l'eau contenue dans le sol et l'accumulent dans leurs tissus ou la retournent vers l'atmosphère par transpiration. Le type de couvert végétal, sa densité et sa maturité auront donc un impact sur la quantité d'eau disponible pour la recharge des aquifères (livrable PACES #28).

Le sol de la région d'étude est recouvert à 67 % de forêts, principalement dans la MRC de La Jacques-Cartier. La forêt mélangée prédomine suivie de forêt de feuillu, d'arbuste et de résineux. Les zones de couvert agricole représentent 10% du territoire terrestre de la CMQ et se retrouvent principalement dans la MRC de L'Île-d'Orléans et dans la Ville de Lévis. Les milieux humides comptent pour 5% du territoire et sont concentrés dans la MRC de La Jacques-Cartier et dans la Ville de Lévis. Près de 14% du territoire terrestre de la CMQ est sans couvert végétal.

Livrable PACES #9 : Milieux humides

Les milieux humides sont des terres qui sont inondées ou saturées en eau assez longtemps pour modifier la composition du sol ou de la végétation. Ce sont généralement des milieux de grande biodiversité. Au même titre que les cours d'eau ou les plans d'eau, les milieux humides peuvent être des lieux d'échanges importants entre l'eau de surface et l'eau souterraine.

Les milieux humides inventoriés représentent 5% du territoire terrestre de la CMQ et se retrouvent principalement dans la Ville de Lévis et la MRC de La Jacques-Cartier. Ils sont composés de tourbières boisées, ombrotrophes ou minérotrophes, de prairies humides, de marécages, de marais et d'eau peu profonde. Les eaux peu profondes, les marais et les marécages sont concentrés en bordure du fleuve Saint-Laurent. La tourbière de la Grande Plée Bleue, qui est le plus vaste milieu humide de la zone d'étude, est localisée au sud du centre-ville de Lévis.

Livrable PACES #10 : Affectation du territoire et Aires protégées

En aménagement ou en urbanisme, l'affectation du territoire représente l'attribution à un territoire d'une utilisation, d'une fonction ou d'une vocation déterminée¹. Les grandes affectations du territoire indiquent formellement comment une municipalité ou une MRC entend utiliser son territoire. L'affectation du territoire peut être un moyen de contrôle pour régir les activités sur le territoire. Pour la gestion durable des eaux souterraines, l'affectation du territoire pourrait être établie en tenant compte des zones de recharge préférentielle et de vulnérabilité élevée des aquifères, c'es-à-dire là où les eaux d'infiltration en surface atteignent rapidement les aquifères.

Sur la carte du Livrable PACES#10, neuf affectations sont présentées, soit les affectations de conservation, agricole, forestière, récréo-forestière, récréative, industrielle, urbaine, périurbaine et militaire. Dans le nord peu habité de la CMQ, les affectations récréo-forestière et forestière prédominent alors que, dans le sud, les affectations agricoles et urbaines sont les plus fréquentes.

Une aire protégée est un territoire, en milieu terrestre ou aquatique, géographiquement délimitée et dont l'encadrement juridique et l'administration visent spécifiquement à assurer la protection et le maintien de la diversité biologique et des ressources naturelles et culturelles associées². La CMQ compte plus de 400 km² d'aires protégées, la majeure partie étant comprise dans le Parc national de la Jacques-Cartier, la Réserve nationale de faune du Cap-Tourmente, la Réserve écologique de Tantaré, les Battures de Saint-Augustin-de-Desmaures, la Forêt ancienne du Mont-Wright et la Réserve écologique de la Tourbière-de-Shannon.

Livrable PACES #11 : Pédologie

La pédologie est la science étudiant la formation et les modifications du sol, ainsi que ses propriétés. La connaissance de la composition des sols aide à la compréhension de plusieurs processus dynamiques liés à l'eau, notamment l'infiltration de l'eau dans le sol et la vulnérabilité des nappes souterraines.

Les types de sols sont cartographiés en fonction de leur texture et leur capacité de drainage. Sur la rive nord, des sols de type argileux, variant de bien à mal drainés, dominent les Basses-terres du Saint-Laurent. Dans les Laurentides, les sols proviennent de dépôts de till sur les plateaux et de sols sableux graveleux ou organiques dans les vallées et ils sont généralement bien à modérément bien drainés. L'île d'Orléans est principalement recouverte de sols loameux avec

¹ MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES DES RÉGIONS ET DE L'OCCUPATION DU TERRITOIRE. *Grandes affectations du territoire*. Adresse URL : <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/amenagement-du-territoire/guide-la-prise-de-decision-en-urbanisme/planification/grandes-affectations-du-territoire/>, consulté le 6 janvier 2013.

² MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Les aires protégées au Québec*. Adresse URL : http://www.mddefp.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/aires_quebec.htm, consulté le 6 janvier 2013.

certaines zones argileuses ou graveleuses. La capacité de drainage de ces sols varie de bien à mal drainé. La rive sud montre une grande diversité de texture et de drainage.

Livrable PACES #12 : Géologie des dépôts meubles

La carte géologique des dépôts meubles représente la distribution spatiale des dépôts de sols non consolidés qui recouvrent le socle rocheux. Ces dépôts ont principalement été formés pendant et depuis la dernière glaciation de la période géologique du Quaternaire. Ces dépôts meubles, souvent appelés dépôts quaternaires, ont des propriétés aquifères variables selon leur nature. Les tills sont des dépôts glaciaires qui contiennent une grande gamme de sédiments, allant de fins (silt ou argile) à très grossiers (sable, gravier, bloc). Sur la rive nord, le till est généralement sableux, alors que sur la rive sud, il est plus fin et agit en tant qu'aquitard (unité géologique peu perméable). Au contraire, les dépôts deltaïques et fluvioglaciaires, contiennent des sédiments grossiers qui peuvent constituer d'excellents aquifères. Les sédiments silteux et argileux déposés dans des lacs ou des mers formés avant ou après la glaciation constituent des aquitards. De plus, selon leur nature, les dépôts meubles influencent l'écoulement de l'eau souterraine dans les aquifères rocheux fracturés sous-jacents. Ils peuvent, entre autres, influencer la recharge, le confinement de l'aquifère, la vulnérabilité de l'aquifère à la contamination et les conditions de résurgence de l'eau souterraine.

Le territoire de la CMQ a été envahi par la Mer de Champlain suite au dernier épisode glaciaire. L'élévation maximale du niveau de la Mer, par rapport à l'altitude actuelle, a été environ 200 m. Sous cette altitude, au sud de la région, le roc est souvent recouvert de dépôts d'origine marine. Sur la rive sud, ces dépôts marins sont généralement composés de particules fines (silteuses). Sur le piémont laurentien, on retrouve d'importantes épaisseurs de dépôts à grains moyens à grossiers (sableux à graveleux) d'origine marine (dépôts littoraux), deltaïque ou fluvioglaciaire. Dans la basse ville de Québec, les dépôts sont épais et leur succession est complexe, alors que sur l'île d'Orléans et sur le Promontoire de Québec, une couche mince de dépôts de sable ou de silt recouvre le roc. Sur les hauts topographiques des Laurentides, où le roc affleure souvent, les dépôts meubles sont principalement des tills minces. Ces tills forment un mélange de particules broyées du roc et laissées en place lors du retrait des glaciers. Des sédiments fluvioglaciaires et des alluvions sableuses sont présents dans les vallées laurentiennes.

Livrable PACES #13 : Géologie simplifiée du roc

La carte de la géologie du roc présente la distribution spatiale des différents types de roches qui peuvent être observées dans la région ainsi que les principales failles qui les affectent. Lorsque les roches sont fracturées, elles peuvent constituer un aquifère et des puits peuvent y être aménagés pour exploiter la ressource. L'eau souterraine peut y résider suffisamment longtemps pour dissoudre une partie des minéraux contenus dans la roche. Cela peut avoir un effet sur la

qualité de l'eau souterraine lorsque la concentration de certains composés dissous dans l'eau souterraine est trop élevée.

Le secteur couvert par le territoire de la CMQ recoupe trois grands ensembles géologiques, soient, du nord au sud, la Province de Grenville, la Plate-Forme du Saint-Laurent et les Appalaches. Dans la Province de Grenville, qui fait partie du Bouclier canadien, on observe des roches d'âge Protérozoïque (environ 1 milliard d'années), constituées d'un assortiment de roches métamorphiques (gneiss) et de roches ignées (granite, anorthosite et gabbro). Les roches métamorphiques se seraient formées à plus d'une vingtaine de kilomètres sous la surface, en constituant l'assise d'une chaîne de montagne aussi haute à l'époque que l'Himalaya actuellement. Les roches sédimentaires de la Plate-Forme du Saint-Laurent, datant de l'Ordovicien (environ 500 millions d'années), reposent sur le socle de la Province de Grenville et sont généralement sous la forme de strates subhorizontales. Elles deviennent toutefois inclinées le long des failles normales qui les recoupent suivant un axe parallèle au fleuve Saint-Laurent. Ces roches se sont formées par l'accumulation de sédiments sur la marge d'un ancien bassin océanique et sont principalement composées de calcaires, de shales, de grès, d'ardoise et de dolomie. La faille (ou ligne) Logan sépare la Plate-forme du Saint-Laurent des Appalaches dont les formations occupent le sud du fleuve Saint-Laurent, l'île d'Orléans et le Promontoire de Québec. Dans la CMQ, les Appalaches consistent en des roches métasédimentaires d'âge cambrien et ordovicien (environ 500 millions d'années) qui ont été déformées de façon répétée, mais non métamorphisées.

Livrable PACES #14 : Coupes hydrostratigraphiques

Les coupes hydrostratigraphiques sont des représentations verticales des matériaux géologiques présents sous la surface du sol. Elles représentent la superposition verticale et latérale des unités géologiques et des hydrofaciès. Un hydrofaciès est composé de matériaux géologiques (dépôts meubles ou roches) aux propriétés hydrauliques similaires. Cette définition des couches par hydrofaciès permet de distinguer les hydrofaciès desquels l'eau souterraine peut facilement être extraite (aquifères) des hydrofaciès qui permettent difficilement à l'eau d'y circuler (aquitards). Les coupes sont dessinées à partir de la carte de la Géologie du Quaternaire (livrable PACES #12) et des données de forages, qui donnent des informations sur les matériaux géologiques rencontrés en surface et en profondeur, respectivement. Une interprétation doit ensuite être faite sur les regroupements de matériaux géologiques ayant des propriétés hydrogéologiques similaires ainsi que sur la continuité latérale des unités d'un forage à l'autre.

Six coupes sont présentées et sont représentatives des principaux contextes hydrostratigraphiques de la CMQ. Les coupes A-A' et B-B', tirées de Lefebvre *et coll.* (2003)³, montrent le contexte

³ Lefebvre *et coll.*, 2003 – LEFEBVRE, R., BOUTIN, A., MARTEL, R., THERRIEN, R., PARENT, M., BLAIS, V. *Caractérisation et modélisation numérique de l'écoulement et de la migration de la contamination en TCE dans*

des dépôts marins deltaïques de la vallée de la rivière Jacques-Cartier. Dans ce secteur, la séquence stratigraphique est principalement constituée de dépôts deltaïques sableux formant un aquifère pouvant atteindre 45 m d'épaisseur. Des couches silteuses discontinues (aquitard) sont toutefois présentes par endroits.

La coupe C-C' produite par l'Université Laval est située dans la basse ville de Québec et montre le contexte du delta du Proto-Saint-Laurent. Dans ce secteur, les dépôts meubles peuvent atteindre 80 m d'épaisseur. On retrouve deux aquifères distincts et séparés par les silts marins. Le premier se trouve dans le roc fracturé et l'autre dans la couche de sable d'origine deltaïque.

La coupe D-D' est située de part et d'autre de la rivière Montmorency à Québec et à Boischatel, à la limite des roches de la Plate-forme du Saint-Laurent et de la Province de Grenville. À l'ouest de la rivière, les dépôts peuvent atteindre 66 m d'épaisseur et sont constitués principalement de silt (aquitard) recouvert de sable d'origine marine. À l'est, des dépôts deltaïques sableux comprenant des couches de silt discontinues prédominent et forment un aquifère. Sous la rivière, les dépôts sont grossiers, formés de sable et gravier.

La coupe hydrostratigraphique E-E' est située sur la rive sud de part et d'autre de la rivière Chaudière. Dans ce secteur, les sédiments atteignent une épaisseur maximale de 22 m. Par endroit, du silt d'origine marine forme un aquitard sur le roc. Des alluvions sableuses bordent la rivière et un petit amas de sable et gravier d'origine fluvioglaciale est présent à l'est de la coupe.

La coupe F-F' est aussi située sur la rive sud, de part et d'autre de la rivière Etchemin, où les dépôts meubles peuvent atteindre 90 m d'épaisseur. Une importante couche de dépôts de silt argileux marins recouvre le roc et forme un aquitard à l'exception d'un amas de sable et gravier fluvioglaciaires de grande dimension qui forme un aquifère.

Livrable PACES #15 : 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 potentiellement exploitable. Cependant, si les dépôts meubles sont fins (argile et silt), peu perméables et suffisamment épais, ils formeront plutôt un aquitard. Un aquitard situé au-dessus d'un aquifère le protégera d'une contamination potentielle venant de la surface. La recharge de l'aquifère sous-jacent à partir des précipitations sera cependant réduite en présence de l'aquitard. Les informations sur l'épaisseur et le type de dépôts meubles proviennent principalement des données de forage, des levés géophysiques et des affleurements rocheux. Pour la majorité du territoire de la CMQ, l'épaisseur totale des dépôts meubles a été estimée par interpolation. La

l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada. Rapport final corrigé de l'INRS-ETE au Ministère de la Défense nationale.

qualité de l'estimation dans un secteur dépend de la densité des données à proximité. Dans la portion nord du territoire de la CMQ, le nombre de forages est trop faible pour appliquer la technique d'interpolation et les épaisseurs des dépôts ont été déterminées selon le type de dépôts cartographié en surface (livrable PACES #12).

Dans la zone des Laurentides, les dépôts meubles sont généralement minces sur les montages et plus épais dans les vallées, atteignant 50 m et plus dans les vallées des rivières Jacques-Cartier et Montmorency. On retrouve aussi des épaisseurs importantes de près de 50 m dans le secteur de Saint-Ferréol-les-Neiges et de Saint-Tite-des-Caps. Dans la zone des Basses-Terres du Saint-Laurent, l'épaisseur estimée des dépôts meubles, qui varie de 0 à 75 m, est plus importante dans la basse ville de Québec et à l'embouchure de la rivière Cap-Rouge. Des secteurs de dépôts plus épais se trouvent aussi dans le nord-ouest de l'Agglomération de Québec, près de la rivière Nelson, et au nord de l'embouchure de la rivière Montmorency. Sur le Promontoire de Québec, les dépôts sont très minces, ne dépassant pas 5 m. Sur la rive sud, les dépôts meubles se sont accumulés dans les dépressions du roc et ont généralement des épaisseurs de 0 à 40 m. Une zone allongée, à l'ouest de la rivière Etchemin et perpendiculaire au fleuve Saint-Laurent, présente des dépôts très épais, de plus de 70 m. Sur l'île d'Orléans, les dépôts meubles sont généralement très minces, de moins de 10 m. On observe toutefois trois zones plus profondes atteignant près de 20 m à Saint-François-de-l'Île-d'Orléans, Sainte-Famille et Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans.

Livrable PACES #16 : Topographie du roc

La carte de la topographie du roc représente une estimation de l'élévation de la surface du roc. Contrairement à la topographie de la surface (livrable PACES #1), il n'est pas possible de connaître la topographie du roc qui est enfoui sous les dépôts meubles à moins de disposer de données de forages ou d'affleurements rocheux indiquant la profondeur du roc. La précision de l'estimation de la topographie du roc dépend donc surtout de la quantité et de la répartition spatiale des données de forage. La topographie du roc sert à identifier les dépressions (creux) importantes du roc où peuvent s'accumuler une grande quantité de dépôts meubles qui peuvent avoir un potentiel aquifère intéressant si ces sédiments sont grossiers (sables et graviers). La topographie du roc a été obtenue en soustrayant l'épaisseur totale des dépôts meubles (livrable PACES #15) du modèle numérique de terrain (livrable PACES #3).

De manière générale, la topographie du roc de la CMQ reflète la topographie de la surface, à l'exception des vallées importantes comblées de sédiments. Sur la rive nord, l'élévation du roc diminue du nord vers le sud, passant de près de 1000 m à la frontière nord de la CMQ à 70 m sous le niveau moyen de la mer dans le secteur de la basse ville de Québec. La surface du roc au sommet du Promontoire de Québec est relativement plane, entre 80 et 100 mètres d'élévation, mais présente en bordure des escarpements importants pouvant atteindre près de 100 mètres de dénivelé. Sur la rive sud, l'élévation de la surface du roc diminue graduellement du sud vers le nord, passant d'environ 120 m à la bordure sud du territoire à 0 m près du fleuve Saint-Laurent.

À l'île d'Orléans, la topographie du roc forme une crête centrale parallèle à l'île culminant à près de 150 m et diminuant jusqu'à 0 m en bordure du fleuve.

Livrable PACES #17 : Contextes hydrostratigraphiques

Un contexte hydrostratigraphique représente les empilements de dépôts meubles reposant sur roc. Ces contextes exercent une influence sur l'écoulement et la qualité de l'eau souterraine. Cette carte est une représentation simplifiée du modèle hydrostratigraphique 3D généré à partir des données de forages, de la géologie du Quaternaire (livrable PACES #12), des levés géophysiques et de la carte de l'épaisseur des dépôts (livrable PACES #15).

Sur la rive sud, la succession de dépôts meubles comprend principalement des couches de matériaux silteux peu perméables, à l'exception du nord-est de Lévis où le till est plus grossier et de certains amas de dépôts sableux tels que décrit au livrable PACES #14. Sur l'île d'Orléans, les dépôts sont généralement peu épais et constitués de silt sableux ou graveleux. La rive nord de la CMQ présente des contextes très variés. Toutefois, la majorité du territoire est caractérisée par un contexte de *Sable et gravier silteux sur roc* qui comprend principalement des unités de till grossier et des sédiments marins d'eau peu profonde. Dans les basses terres, une couche de silt peu perméable est présente en profondeur dans les zones où les dépôts sont plus épais. Le delta du Proto Saint-Laurent (livrables PACES #14, coupe C-C') présente une succession de dépôts plus complexe de *Silt, sur sable, sur silt sur roc*. Les contextes de *Dépôts hétérogènes sur roc* et de *Sable et Gravier sur roc* sont présents dans le piémont laurentien, principalement dans les vallées des rivières Montmorency, Jacques-Cartier et Sainte-Anne, et constituent des aquifères granulaires.

Livrable PACES #18 : Confinement et épaisseur des aquifères

Le confinement d'un aquifère est lié à son recouvrement par une couche de matériaux peu perméables (aquitard) qui isole l'eau souterraine qu'il contient. La nature et l'épaisseur des dépôts meubles déterminent le niveau de confinement des aquifères soit non confiné (nappe libre), semi confiné (nappe semi-captive) ou confiné (nappe captive). Les dépôts meubles fins (silt et argile) sont des matériaux confinants. Lorsque les matériaux fins qui recouvrent un aquifère sont plus ou moins perméables ou de faible épaisseur, on considère l'aquifère sous-jacent comme étant semi confiné. Le confinement influence les divers processus dynamiques et chimiques de l'eau souterraine, en limitant ou favorisant la recharge de l'aquifère ou encore sa protection par rapport à une contamination provenant de la surface.

Sur le territoire de la CMQ, quatre conditions de confinement ont été définies à partir des épaisseurs estimées de sédiments fins pour l'aquifère rocheux régional et pour les aquifères de dépôts meubles. Ces conditions sont confiné, semi confiné, non confiné et discontinu.

La carte PACES #17a présente le confinement de l'aquifère de roc fracturé. Sur la rive sud, l'aquifère de roc fracturé est confiné et semi confiné en grande partie. À l'île d'Orléans, l'aquifère de roc fracturé est non confiné à l'exception de certains secteurs de plus grande épaisseur de dépôts meubles. Sur la rive nord, l'aquifère de roc fracturé dans la Plate-forme du Saint-Laurent est confiné ou semi confiné par endroit, notamment en bordure du fleuve à l'est de la MRC de La Côte-de-Beaupré, à l'ouest de la rivière Montmorency, dans le delta du Proto-Saint-Laurent et dans les zones de dépôts épais de l'Agglomération de Québec. L'aquifère de roc fracturé de la Province de Grenville est généralement non confiné. Toutefois, certains secteurs dans les vallées des rivières Nelson et Saint-Charles au nord de l'Agglomération de Québec ainsi que dans la vallée de la rivière aux Pins dans la partie nord de Shannon sont semi confinés ou confinés. Le confinement est généralement discontinu à l'endroit des grands complexes deltaïques de la rivière Jacques-Cartier, de l'est de la rivière Montmorency et du secteur de Saint-Ferréol-les-Neiges et de Saint-Tite-des-Caps.

Le confinement et l'épaisseur des principaux aquifères de dépôts meubles sont présentés au livrable PACES #17b. Sur la rive sud, les aquifères de dépôts meubles sont rares. Toutefois, un aquifère de dépôts meubles pouvant atteindre 60 m d'épaisseur et partiellement confiné est présent à l'ouest de la rivière Etchemin. D'autres aquifères de dépôts de petite taille sont présents, notamment au sud de la rivière Beaurivage. À l'île d'Orléans, aucun aquifère de dépôts meubles n'a été décelé. Dans la basse ville de Québec et à l'embouchure de la rivière Cap-Rouge, on retrouve les aquifères de dépôts meubles du Proto-Saint-Laurent. Ces aquifères sont semi confinés par endroit et leur épaisseur atteint 30 m. Plus au nord, les principaux aquifères granulaires sont généralement non confinés et se retrouvent dans les sables et graviers des vallées des rivières Jacques-Cartier, Montmorency, des Pins et Hurons ainsi que dans les secteurs situés au nord de L'Ange-Gardien, au sud du lac Saint-Charles et à l'ouest du lac Beauport. Leur épaisseur maximale peut atteindre 50 m dans la vallée de la Jacques-Cartier, mais est plutôt de l'ordre de 15 à 30 mètres dans les autres secteurs. Plus à l'est, les secteurs de Beaupré, de Saint-Ferréol-les-Neiges et de Saint-Tite-des-Caps comportent d'importants aquifères granulaires généralement non confinés allant jusqu'à 30 m d'épaisseur.

Livrable PACES #19 et #20 : Piézométrie des aquifères de dépôts meubles et de roc fracturé

La piézométrie est l'élévation du niveau de l'eau souterraine (ou niveau piézométrique) mesurée dans un puits. Lorsqu'il y a suffisamment de puits dans un secteur ou une région, il est possible d'estimer ces niveaux sur tout le territoire. Tout comme la carte topographique l'est pour l'élévation du sol, la carte piézométrique représente l'élévation du niveau de l'eau souterraine dans un aquifère. La piézométrie indique le sens de l'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère, qui va des zones à piézométrie plus élevée vers celles où la piézométrie est plus basse.

Pour la majeure partie du territoire de la CMQ, la piézométrie des aquifères de roc fracturé a été estimée par interpolation. La qualité de l'estimation dans un secteur dépend de la densité des puits à proximité. La piézométrie des aquifères de roc fracturé de la partie septentrionale, à défaut d'une densité suffisante de puits pour l'interpolation, a été estimée à partir de la topographie.

La carte piézométrique de la CMQ montre clairement que la topographie influence la piézométrie qui est, en quelque sorte, une reproduction adoucie du modèle numérique de terrain (livrable PACES #3). L'élévation des niveaux piézométriques passe de près de 1 000 m à la frontière nord de la CMQ à 0 m en bordure du fleuve Saint-Laurent. Sur la rive sud, les plus hauts sommets piézométriques sont de l'ordre de 100 m d'élévation et sont situés à la frontière sud où la topographie des Appalaches commence à s'accroître. L'écoulement régional s'effectue donc globalement du nord-ouest vers le sud-est sur la rive nord, et du sud-est vers le nord-ouest à Lévis. Sur l'île d'Orléans, l'écoulement est radial, soit du centre de l'île vers son contour. Ultimement, le fleuve Saint-Laurent constitue l'axe majeur de résurgence de l'eau souterraine sur tout le territoire de la CMQ. Les aquifères de dépôts meubles du Proto-Saint-Laurent, qui sont séparés de l'aquifère de roc sous-jacent, ont toutefois une piézométrie similaire à ce dernier.

Livrable PACES #21 : Paramètres hydrauliques

Les propriétés hydrauliques d'un aquifère sont généralement obtenues en pompant l'eau d'un puits et en y mesurant les variations du niveau d'eau. La conductivité hydraulique (K) est la capacité d'un milieu géologique à permettre l'écoulement de l'eau souterraine dans les pores des dépôts meubles ou les fractures d'un aquifère rocheux. Sur le territoire de la CMQ, les aquifères qui sont les plus productifs sont principalement composés de particules de taille moyenne (sable) à grossière (gravier) et dont les conductivités hydrauliques sont plus élevées (environ 8 à 9 mètres/jour). En absence d'un aquifère de sable ou de gravier, le roc fracturé devient le seul aquifère exploitable, bien que l'écoulement de l'eau vers le puits de captage soit plus lent. Les sols dont les particules ont une taille très fine à fine possèdent des conductivités hydrauliques plus faibles, ce qui restreint l'écoulement de l'eau. Lorsqu'ils sont au-dessus d'un aquifère, ces sols de faible conductivité hydraulique assurent une protection contre les activités potentiellement polluantes exercées en surface.

Taille des particules de sols	Type de dépôts	Nombre de données	Valeur de K (en mètres/jour)
Très fine à fine	Silt, argile silteuse	4	-
Fine	Silt sableux/graveleux	39	0,02
Fine à moyenne	Sable/gravier silteux	278	3
Moyenne	Sable	118	8
Moyenne à grossière	Sable et gravier	56	9
Non applicable	Roc fracturé	29	0,04

Livrable PACES #22 : Vulnérabilité des aquifères selon l'indice DRASTIC

La vulnérabilité d'un aquifère est sa sensibilité à la pollution de l'eau souterraine à partir de l'émission de contaminants à la surface du sol. Une carte de vulnérabilité permet donc d'identifier les zones les plus vulnérables à la contamination et de fournir un outil d'aide à la prise de décision pour aménager le territoire tout en protégeant la ressource en eau souterraine. La carte de vulnérabilité 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. Le programme PACES spécifie que la méthode DRASTIC doit être utilisée pour évaluer la vulnérabilité. La méthode DRASTIC permet le calcul d'un indice à partir de 7 paramètres.

Sur le territoire de la CMQ, la méthode DRASTIC a été appliquée pour les aquifères rocheux, à moins qu'un aquifère de dépôts meubles ne soit présent (par ex. : dans la vallée de la rivière Jacques-Cartier, Montmorency, Sainte-Anne de même que pour les aquifères du Proto-Saint-Laurent). Le livrable PACES #22 montre aussi des cartes en petit format pour chacun des paramètres de la méthode DRASTIC. Il y a une importante variabilité spatiale de l'indice DRASTIC à l'intérieur et entre les contextes hydrogéologiques. Dans les Laurentides, où l'aquifère de roc est recouvert par des dépôts de till, l'indice DRASTIC est généralement moyen. Par contre, dans le fond des vallées laurentiennes, des aquifères de dépôts meubles plus perméables et des pentes du sol plus faibles ont pour effet d'augmenter la vulnérabilité des aquifères. Dans le piémont laurentien, particulièrement au droit des grands complexes de sédiments deltaïques ou fluvioglaciaires, la vulnérabilité est également élevée. Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, la présence de dépôts meubles silto-argileux en surface tend à diminuer la vulnérabilité des aquifères. C'est particulièrement le cas sur la majorité de la rive sud, à Lévis, où la vulnérabilité est faible en raison de la présence de dépôts silto-argileux épais qui confinent l'aquifère de roc. Quelques zones de la partie nord des Basses-Terres du Saint-Laurent présentent un contexte similaire associé à une faible vulnérabilité. Dans la basse ville de Québec, l'aquifère de dépôts meubles est semi confiné et présente une vulnérabilité moyenne. À l'île d'Orléans, sur le promontoire de Québec, à Cap-Rouge et à l'est de Lévis, l'aquifère de roc est près de la surface et sa vulnérabilité est généralement moyenne, variant selon la perméabilité des dépôts de surface et la profondeur de l'aquifère.

Livrable PACES #23 : Activités anthropiques potentiellement polluantes

Les activités anthropiques peuvent poser un risque pour la qualité de l'eau souterraine. Le livrable PACES #23 présente la densité du risque potentiel de contamination relié aux activités anthropiques et vise principalement à faire ressortir les tendances régionales de la pression que ces activités pourraient exercer sur la qualité de l'eau souterraine. Les sites contaminés du Répertoire des terrains contaminés du MDDEFP sont également présentés sur la carte.

L'indice de densité du risque des activités anthropiques reflète la présence de centres urbains ainsi que de fortes activités industrielles. Les plus fortes valeurs estimées sont principalement localisées dans l'Agglomération de Québec et dans la Ville de Lévis. Ces secteurs correspondent également à la présence de nombreux sites contaminés répertoriés par le MDDEFP. La carte ne présente pas les sites contaminés issus de l'inventaire fédéral et la méthode de détermination de l'indice de densité des activités anthropiques ne s'applique pas à la base militaire de Valcartier qui est sous juridiction fédérale. Il faut aussi considérer la vulnérabilité de l'aquifère et l'importance de son exploitation pour cibler les secteurs prioritaires pour la protection de la qualité de l'eau souterraine par rapport aux activités anthropiques.

Livrable PACES #24 : Qualité de l'eau souterraine (critères de potabilité)

L'usage de l'eau souterraine dépend de sa qualité, c'est-à-dire de la concentration dans l'eau de différents composés chimiques. Dans le cas du livrable PACES #24, les résultats d'analyses chimiques sont comparés aux concentrations maximales acceptables définies par les Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada⁴. Lorsque la concentration d'un composé chimique dans l'eau dépasse la concentration maximale acceptable, la consommation de cette eau pose un risque pour la santé.

Dans la CMQ, 141 échantillons d'eau souterraine de puits différents ont été prélevés dans le cadre de l'étude PACES. Parmi les 46 paramètres physico-chimiques analysés pour ces échantillons, des dépassements des critères de potabilité ont été notés pour deux paramètres. Ces dépassements étaient pour des échantillons prélevés dans des puits dans le roc fracturé. Le critère de potabilité a été excédé pour 1 % (2/141 échantillons) des analyses en baryum et 13% (18/141 échantillons) des analyses en fluorures. Les dépassements ne montrent pas de tendance spatiale particulière, mais pourraient être attribuables à la composition minéralogique du socle rocheux. La qualité naturelle de l'eau dans les aquifères de la CMQ est considérée comme étant généralement bonne.

Livrable PACES #25 : Qualité de l'eau souterraine (objectifs esthétiques)

Le livrable PACES #25 compare la qualité de l'eau avec des objectifs esthétiques établis par le CEP (2012)⁴. La consommation d'une eau dont la concentration d'un composé chimique dépasse les objectifs esthétiques peut entraîner des désagréments (goût, odeur, couleur), mais n'a pas d'incidence sur la santé.

⁴ CEP, 2012 – COMITÉ FÉDÉRAL-PROVINCIAL-TERRITORIAL SUR L'EAU POTABLE. *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Tableau sommaire*. Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable, septembre 2012. Adresse URL : http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/2012-sum_guide-res_recom/index-fra.php

Dans la CMQ, 141 échantillons d'eau souterraine de puits différents ont été prélevés dans le cadre de l'étude PACES. Parmi les 46 paramètres physico-chimiques analysés pour ces échantillons, des dépassements des objectifs esthétiques ont été notés pour 10 paramètres, soit : le pH (50% des échantillons montrant un dépassement), la matière dissoute totale (19%), le manganèse (17%), le fer (12%), le sodium (9%), les sulfures (8%), les chlorures (6%), l'aluminium (4%), la dureté (5%) et les sulfates (1%). Les dépassements en sodium et en chlorures sont principalement dans les Appalaches et les Basses-Terres du Saint-Laurent. Ils sont aussi associés aux dépassements en matière dissoute totale. Les dépassements en fer et en manganèse sont dispersés sur l'ensemble du territoire, mais tous les échantillons prélevés dans la basse ville de Québec présentent des dépassements. C'est aussi à cet endroit que sont localisés les dépassements du critère de la dureté. L'eau souterraine de ce secteur n'est cependant pas utilisée pour l'alimentation en eau potable, car toutes les résidences sont reliées au réseau d'aqueduc de la ville. Les dépassements en aluminium ne présentent pas de tendance spatiale, mais tous les dépassements se retrouvent dans les aquifères au roc. Les dépassements pour les sulfures sont localisés dans la partie ouest de la CMQ, autant dans les aquifères granulaires que fracturés. En se basant sur les dépassements du critère pour le pH, il semble que les eaux souterraines de la rive sud et de l'île d'Orléans soient plus alcalines que celles de la rive nord.

Livrable PACES #26 : Utilisation de l'eau souterraine

Les besoins en eau pour différents usages peuvent être comblés par différentes sources d'approvisionnement, selon la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. De façon générale, les utilisateurs s'alimentent en eau de surface ou en eau souterraine par l'intermédiaire des systèmes publics (par exemple des aqueducs) ou de systèmes privés comme des puits au roc. Au Québec, les données sur l'utilisation de l'eau et les sources d'approvisionnement proviennent soit d'organismes publics (ministères provinciaux, municipalités, MRC, etc.) ou d'entreprises privées. Le livrable PACES #26 distingue, pour la ressource en eau souterraine seulement, les volumes prélevés annuellement pour les utilisations résidentielle et industrielle/commerciale/institutionnelle (ICI), en excluant l'utilisation agricole.

Sur le territoire de la CMQ, la MRC de La Jacques-Cartier est le plus grand préleveur d'eau souterraine avec environ 5,8 millions de m³ par année (Mm³/an), suivi par l'Agglomération de Québec (5,4 Mm³/an), la MRC de La Côte-de-Beaupré (1,6 Mm³/an), la Ville de Lévis (1,1 Mm³/an) et la MRC de l'Île-d'Orléans (1,0 Mm³/an). L'estimation de ces volumes ne considère pas l'usage agricole.

Livrable PACES #27 : Emplacements des stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques

Le livrable PACES #27 présente la répartition spatiale des stations de mesure permanentes pour la météorologie, l'hydrométrie (débit des principaux cours d'eau) et la piézométrie (niveau de l'eau souterraine).

La CMQ est relativement bien pourvue en stations de mesure avec 12 stations météorologiques actives (36 stations sont inactives) et avec 13 stations hydrométriques actives (17 stations sont inactives). Celles-ci sont cependant concentrées dans les secteurs habités du territoire, la moitié nord étant faiblement couverte. La CMQ ne compte que trois puits d'observation du réseau de suivi du MDDEFP. Dans le cadre de l'étude PACES, des appareils de mesure de niveaux d'eau ont été installés dans quatre puits additionnels.

Livrable PACES #28 : Bilan hydrologique et recharge des aquifères

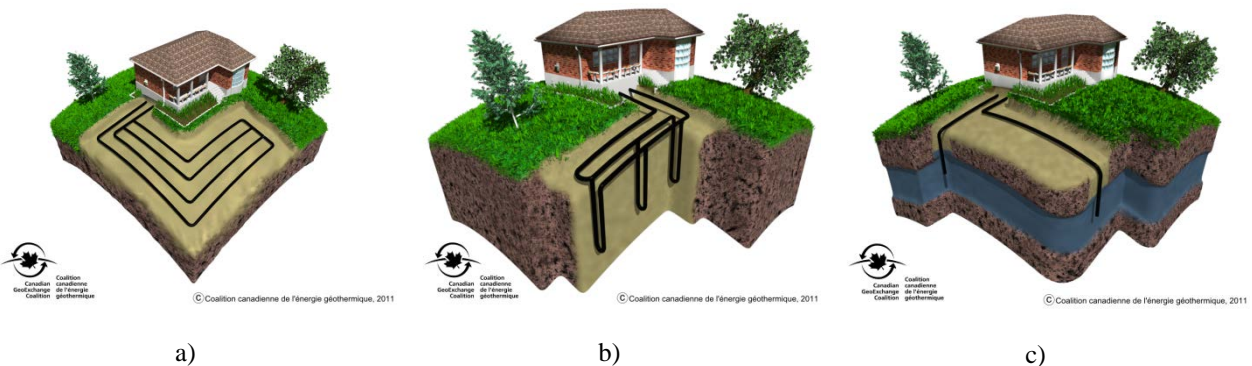
L'estimation de la recharge est nécessaire pour évaluer les ressources disponibles en eau souterraine. En effet, les débits qui peuvent être exploités de façon durable dépendent grandement du renouvellement de l'eau souterraine, qui est la recharge. Cependant, la quantité d'eau qui s'infiltré pour recharger les aquifères est l'un des paramètres hydrogéologiques les plus difficiles à évaluer.

La recharge a été estimée avec le logiciel HELP[®] (*Hydrological Evaluation of Landfill Performance*). Le logiciel intègre plusieurs données sur le climat, la végétation, l'occupation du territoire et sur les propriétés des sols, des dépôts et du roc. En plus d'estimer la recharge sur l'ensemble du territoire, HELP calcule les autres paramètres du bilan hydrologique, soient l'évapotranspiration et le ruissellement de l'eau à la surface du sol et en profondeur. La recharge a été estimée pour les aquifères de roc fracturé, à moins qu'un aquifère de dépôts meubles ne soit présent. Deux zones climatiques ont été distinguées sur le territoire de la CMQ soient les hautes terres et les basses terres. Des valeurs élevées de recharge, de l'ordre de 450 mm/an (1/3 des précipitations), sont estimées dans les hautes terres. Dans cette zone, les températures sont plus froides et les précipitations moyennes sont plus élevées de 111 mm/an que dans la zone des basses terres. Les sols sont généralement plus perméables dans les hautes terres. Dans les basses terres, l'effet combiné de l'urbanisation, qui augmente le ruissellement, et la présence de dépôts meubles de faible perméabilité limite l'infiltration de l'eau dans les sols et réduisent la recharge. Sur le territoire de la CMQ, la recharge la plus faible est à Lévis et sur la couronne nord des basses terres avec des valeurs de l'ordre de 50 à 100 mm/an. Des recharges intermédiaires, de l'ordre de 200 mm/an, sont calculées pour l'île d'Orléans et à quelques endroits (ex. pointe nord-est de Lévis) où une faible épaisseur de dépôts recouvre l'aquifère de roc fracturé.

Sur une base annuelle, la recharge s'effectue principalement à la fonte printanière de la neige et à l'automne lorsque les prélèvements d'eau des végétaux sont moindres.

Livrable PACES #29 : Potentiel géothermique

L'exploitation de l'énergie géothermique consiste à extraire l'énergie thermique du sous-sol pour des fins de chauffage ou de climatisation. En hiver, lorsque la température de l'air est plus froide que celle du sol, le système géothermique est utilisé pour chauffer le bâtiment tandis qu'en été, lorsque la situation s'inverse, le système sert à rafraîchir l'air du bâtiment. Au Québec, les seules technologies géothermiques utilisées actuellement sont celles de basses à très basses températures : les systèmes à boucles fermées horizontales, à boucles fermées verticales et à boucles ouvertes. Un potentiel a été évalué pour chacun de ces trois systèmes géothermiques.



Systèmes géothermiques a) en boucles fermées horizontales, b) en boucles fermées verticales et c) en boucles ouvertes (CCÉG, 2011)

Les systèmes à boucles fermées consistent à aménager des tuyaux dans le sol pour y faire circuler un liquide, du même type que celui utilisé pour le refroidissement du moteur d'un véhicule. Ce liquide, dit caloporteur, extrait la chaleur du sol pour la retourner en surface vers un échangeur de chaleur (thermopompe) du bâtiment. Les systèmes à boucles fermées horizontales sont installés à faible profondeur, généralement dans les trois premiers mètres de sols. Le potentiel géothermique des systèmes à boucles fermées horizontales est faible comparé aux autres technologies, mais a l'avantage d'être moins dispendieux. Sur le territoire de la CMQ, le potentiel de ce type d'installation est inférieur, avec des conductivités thermiques qui vont jusqu'à 2,4 W/mC. La présence de dépôts sableux et d'une nappe d'eau au niveau de l'installation (0 à 3 m) augmente le potentiel géothermique de ces systèmes. Le potentiel est nul lorsque l'épaisseur estimée des dépôts est inférieure à 2 m et qu'il est impossible d'installer le système.

Dans les systèmes à boucles fermées verticales, les tuyaux dans lesquels circule le liquide caloporteur sont installés à l'intérieur de forages, qui ont généralement une centaine de mètres de profondeur. Le potentiel géothermique à boucles fermées verticales a donc été évalué sur les

premiers 100 m et est fortement dépendant de la lithologie du roc. À l'exception de la zone d'anorthosite, le potentiel géothermique en boucles fermées verticales est supérieur dans les Laurentides où le roc conduit plus facilement la chaleur comparativement aux roches de la Plateforme du Saint-Laurent et des Appalaches. Les dépôts meubles qui conduisent moins bien la chaleur atténuent le potentiel lorsqu'ils sont plus épais, comme dans la vallée de la Jacques-Cartier ou dans la basse ville de Québec.

Contrairement aux systèmes à boucles fermées verticales, les systèmes à boucles ouvertes pompent directement l'eau souterraine dans un puits pour en extraire la chaleur avec une thermopompe du bâtiment. L'eau est ensuite réinjectée dans son milieu aquifère par un autre puits. Contrairement aux systèmes en boucles fermées, le potentiel géothermique des systèmes en boucles ouvertes ne dépend pas principalement de la conductivité thermique des unités géologiques, mais plutôt de la capacité de l'aquifère à soutenir un débit de prélèvement en eau, qui est reliée à la transmissivité. Sur le territoire de la CMQ, les secteurs à potentiel supérieur sont situés dans les grands complexes fluvioglaciers et deltaïques des rivières Jacques-Cartier, Montmorency et Sainte-Anne. Même si les aquifères du Proto-Saint-Laurent, situés dans la basse ville de Québec, apparaissent intéressants pour la géothermie en boucles ouvertes, la chimie de l'eau souterraine (concentrations élevées en fer, manganèse de même qu'une dureté et un pH élevés) pourrait entraîner des problèmes de colmatage des systèmes et limiter leur efficacité.