



MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR
ETIENNE HUDON-GAGNON, géol. stag.

CONSTRUCTION D'UN MODÈLE HYDROSTRATIGRAPHIQUE
GRADUELLEMENT SIMPLIFIÉ DES DÉPÔTS QUATERNAIRES ET
SIMULATION HYDROGÉOLOGIQUE DU BASSIN DE LA RIVIÈRE MISTOUK,
AU SAGUENAY-LAC-SAINT-JEAN, QUÉBEC

Juillet 2015

RÉSUMÉ

La stratigraphie et la sédimentologie des dépôts quaternaires ont une grande influence sur l'écoulement de l'eau souterraine dans les aquifères de ces milieux. La description et la détermination des unités, lithofaciès ou hydrofaciès, deviennent donc importantes dans les travaux de terrain lors de l'étude et de la caractérisation d'un aquifère dans ces milieux.

Diverses classifications utilisées dans le domaine de l'eau souterraine ont été étudiées pour suggérer des modifications et même une nouvelle classification dans le cas des hydrofaciès.

La construction de modèles conceptuels 3D d'aquifères constitue un défi important surtout dans les dépôts quaternaires qui présentent une structure interne complexe. La complexité des agencements hydrostratigraphiques nécessite souvent un certain niveau de simplification stratigraphique et structurale pour incorporer ceux-ci dans des modèles 3D numériques d'écoulement souterrain.

Les effets de simplifications hydrostratigraphiques, utilisant la conductivité hydraulique équivalente, sur la précision des modèles numériques d'écoulement souterrain 3D sont évalués à partir d'un exemple. Pour construire le modèle détaillé de l'aquifère du bassin versant de la rivière Mistouk (Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec), des données existantes ainsi que de nouvelles données ont été utilisées. Les résultats des simulations numériques d'écoulement à partir du logiciel *Feflow* pour les différents modèles simplifiés montrent qu'il est possible, avec limitations, de simplifier un modèle hydrostratigraphique 3D. Le degré de justesse des modèles dépend du degré de simplification adopté, mais les résultats suggèrent que la variabilité des résultats obtenus reste modérée. La méthodologie de simplification hydrostratigraphique pour la réalisation de modèles numériques d'écoulement pourra être adoptée pour la simulation des écoulements souterrains dans d'autres contextes d'aquifères de dépôts et devrait ainsi être utile pour les modélisateurs.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier le directeur et le codirecteur de ce projet, respectivement messieurs Romain Chesnaux et Pierre A. Cousineau pour leur disponibilité, leur rigueur et l'encouragement qu'ils m'ont donné tout au long de ce travail de recherche. Je remercie également messieurs Alain Rouleau et Eric Rosa pour la lecture de ce mémoire et leurs commentaires en découlant. Je tiens à souligner la dynamique exceptionnelle créée par le Programme d'Acquisition de Connaissances sur les Eaux Souterraines (PACES-SLSJ) avec la contribution du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. L'affluence de données et de diversité dans les approches a permis d'obtenir des informations de qualité exceptionnelle sur l'eau souterraine au Saguenay-Lac-Saint-Jean. Je remercie aussi Cynthia Vigneault, Emmanuelle B. Gagné et Pierre-Luc Dallaire pour leur support dans l'acquisition des données terrains. Finalement, je remercie ma femme Marie-Ève Parr pour le support exceptionnel et pour les deux gouttes d'eau qui comptent le plus pour moi Magalie et Laurence.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES FIGURES	vii
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE	1
1.2 PROBLÉMATIQUES SPÉCIFIQUES	4
1.3 OBJECTIFS	7
1.4 MÉTHODOLOGIE	8
CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES HYDROFACIÈS.....	12
2.1 FACIES, LITHOFACIES ET HYDROFACIES.....	13
2.2 ÉCHELLES GRANULOMÉTRIQUES.....	14
2.3 LE LITHOFACIÈS DANS LES APPLICATIONS HYDROGÉOLOGIQUES...17	17
2.4 L’HYDROFACIÈS DANS LES APPLICATIONS HYDROGÉOLOGIQUES...20	20
2.5 PROPOSITION DE CLASSIFICATION DES LITHOFACIES ET HYDROFACIES	24
2.5.1 LITHOFACIÈS.....	24
2.5.2 HYDROFACIÈS	28
CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION ET DE SIMPLIFICATION HYDROSTRATIGRAPHIQUE	30

INTRODUCTION	33
STUDY SITE.....	36
METHODOLOGY	39
THE DIFFERENT HYDROSTRATIGRAPHIC MODELS.....	52
COMPARISON OF THE NUMERICAL RESULTS OF THE FIVE DIFFERENT MODELS	53
REGIONAL GROUNDWATER FLOW	56
DISCUSSION AND CONCLUSION	57
CHAPITRE 4 : CONCLUSION	60
RÉFÉRENCES	63
ANNEXE 1	67
GLOSSAIRE	67
ANNEXE 2	70
DONNÉES PIÉZOCONES	70
.....	71
.....	72

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : CLASSIFICATION ET NOMENCLATURE PROPOSEE DES LITHOFACIES	25
TABLEAU 2 : CLASSIFICATION PROPOSEE DES HYDROFACIES	29

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : ECHELLES ET CLASSIFICATIONS GRANULOMETRIQUES SELON LES DIFFERENTS TYPES DE NOMENCLATURES EXISTANTES. TABLEAU REALISE PAR DANIEL CYR (UNIVERSITE DU QUEBEC A MONTREAL) A PARTIR DES TRAVAUX DE SCHOENEGER (2002).....	15
FIGURE 2 : CODE ABREGE DU CENTRE GEOSCIENTIFIQUE DU QUEBEC (SAVARD ET AL., 2007)	17
FIGURE 3 : RELATION ENTRE LES LITHOFACIES ET LES HYDROFACIES (KLINGBEIL AND ET AL., 1999).....	21
FIGURE 4 : COUPE STMN002 INTERPRETEE A L'AIDE DE LA CLASSIFICATION PROPOSEE	27

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Le présent chapitre présente la problématique et les objectifs de cette étude traitant d'une méthodologie de simplification pour la description hydrogéologique des dépôts meubles ainsi que des degrés de simplifications hydrostructurales possibles et raisonnables à des fins de modélisation hydrogéologique dans un aquifère de type granulaire. L'énoncé des objectifs généraux et spécifiques du projet y est présenté. Pour compléter ce chapitre, le plan de travail intégrant la méthodologie et l'enchaînement des chapitres est présenté. Un glossaire de certains termes utilisés dans l'ensemble du mémoire est présenté à l'annexe 1.

1.1 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

L'écoulement de l'eau souterraine est un sujet incontournable associé au développement humain, et ce, pour différents aspects. L'eau souterraine est une ressource stratégique étant donné que 22 % de la population du Québec sur près de 90 % du territoire habité dépend de cette source d'approvisionnement (Gouvernement du Québec, 2012). Les recherches et études réalisées dans ce domaine permettent de prendre des décisions éclairées concernant l'alimentation, la protection en termes de quantité et de qualité et la prospection de nouvelles ressources en eau souterraine. L'exploitation de l'eau souterraine peut s'effectuer dans différentes formations géologiques nommées aquifères. Ceux-ci peuvent être constitués d'un roc fracturé ou de dépôts granulaires non-consolidés.

Une part importante des réserves en eau souterraine provient des dépôts meubles qui recouvrent le roc. On estime que 90 % des aquifères exploités sont composés de sédiments non consolidés (Todd and Mays, 2005). Ces milieux, généralement stratifiés, peuvent être très hétérogènes dans leur composition ainsi que dans la valeur de leur conductivité hydraulique (K) qui contrôle l'écoulement. Les textures sédimentaires comme la granulométrie, le tri, l'arrondi des grains, la composition et les structures sédimentaires, comme les laminations (parallèles, entrecroisées, etc.), les granoclasses (normaux, par densité, etc.) sont les facteurs importants que nous voulons décrire dans les sédiments, car ils sont déterminants pour le contrôle de l'écoulement souterrain. L'une des étapes importantes préalable à l'étude de l'écoulement de l'eau souterraine est la construction du modèle conceptuel de l'environnement dans lequel l'eau s'écoule, soit le contenant, l'eau étant le contenu. Dans ce cas, s'agissant de la stratigraphie des dépôts quaternaires, on peut donc parler de modèle hydrostratigraphique.

Schwartz (2003) propose une classification simplifiée des aquifères dans les sédiments non consolidés : bassin de remplissage, couverture de sable et gravier et sédiments fluvio-glaciaires. Les aquifères de type *bassin de remplissage* se composent principalement de dépôts de sable et de gravier qui remplissent les dépressions et sont aussi communément appelés des aquifères de vallées de remplissage, parce que les bassins qu'ils occupent sont des creux topographiques formant des vallées. Pour ces aquifères, le processus de dépôt peut être étudié afin d'établir l'hydrostratigraphie, mais la morphologie du substratum rocheux doit aussi être prise en compte. Souvent, le cours d'eau ayant

apporté les sédiments n'est plus actif ou son débit est réduit, ce qui diminue d'autant la capacité (c.-à-d., la quantité) et la compétence (c.-à-d., la taille maximale) des sédiments transportés.

Les aquifères de type *couverture de sable et gravier* se forment principalement par transport fluvial dans les plaines alluviales, mais ils peuvent également se former à l'embouchure des rivières dans un plan d'eau, comme un lac ou une mer (p.ex., une plaine deltaïque) où être formés par transport littoral comme le long des rivages. Un transport éolien (p.ex., champ de dunes éoliennes) est aussi possible, mais il n'affecte que la fraction plus fine de sédiments déposés antérieurement. Les sédiments formant ces aquifères sont composés la plupart du temps de sable (moyen à grossier) et de gravier. La majeure partie de l'eau souterraine qui y est contenue constitue une nappe libre et non pas captive. La variabilité dans l'architecture sédimentaire est due à la variation spatiale et temporelle du processus de mise en place.

Les aquifères de type *fluvio-glaciaire* sont présents dans des sédiments qui se sont déposés au cours d'une déglaciation continentale. Une perméabilité très élevée par rapport aux autres types d'aquifères est une des caractéristiques des aquifères fluvio-glaciaires. La fonte des glaciers continentaux n'est pas un processus simple, car il a des incidences directes sur des fluctuations eustatiques des mers, la formation de lacs éphémères pro- et périglaciaires et la remontée isostatique de la croûte continentale sous-jacente. La stratigraphie verticale résultante peut donc être assez complexe et un aquifère granulaire

dont les sédiments sont d'origine glaciaire n'aura pas les mêmes faciès et hydrofaciès qu'un aquifère dont l'origine des sédiments est non glaciaire. Pour toute la diversité des aquifères composés de sédiments meubles, ce sont la nature et les propriétés des dépôts induits par les environnements de sédimentation qui influencent l'écoulement des eaux souterraines.

1.2 PROBLÉMATIQUES SPÉCIFIQUES

La branche de l'hydrogéologie visée par cette étude concerne l'étude des dépôts meubles spécifiquement, soit l'hydrostratigraphie du Quaternaire. Les dépôts du Quaternaire reflètent des environnements présents aussi bien durant les périodes glaciaires que les périodes interglaciaires. Ces dépôts sont constitués essentiellement de sables, de graviers et argiles.

Il y a plusieurs aspects de l'hydrostratigraphie du Quaternaire qui ont déjà été développés et d'autres qui sont en développement. Les premiers concepts de l'hydrostratigraphie ont été établis par Maxey (1964) qui a proposé l'utilisation d'un nouveau terme; l'unité hydrostratigraphique. Il a reconnu le besoin d'ajouter des paramètres tels que la nature du mouvement, de l'emmagasinement et du relâchement de l'eau dans différents milieux ainsi que le détail de l'interstratification, des faciès, du tri et de l'agencement des grains. Pour différencier les unités lithologiques des unités hydrogéologiques, il a défini l'unité hydrostratigraphique comme *un ensemble de roches ou sédiments avec une extension latérale considérable qui compose un cadre géologique pour un système hydrologique raisonnablement distinct*. Le terme aquifère représente une unité, pas nécessairement hydrostratigraphique, ou une combinaison d'unités qui ont une

perméabilité plus élevée que les unités adjacentes et où l'eau est récupérable économiquement. Le terme aquitard est utilisé pour des unités de faible perméabilité relativement à des unités aquifères tandis qu'une unité est qualifiée d'aquiclude si celle-ci est imperméable.

Plusieurs années plus tard, Seaber (1988) a voulu redéfinir l'unité hydrostratigraphique étant donné que le concept et la définition de Maxey (1964) incluent la dynamique du régime hydrogéologique et ne prend pas en compte la composition et les propriétés du matériel en lui-même. Pour ces deux raisons, la définition de Maxey ne pouvait pas être reconnue. Seaber (1988) redéfinit l'unité hydrostratigraphique comme une *masse de roches ou sédiments distincts et caractérisés par une porosité et une perméabilité. Les unités hydrostratigraphiques sont définies par le nombre, la taille, la forme, par l'arrangement et l'interconnexion des interstices et sont reconnues sur la base de la nature, l'extension et la magnitude des interstices dans n'importe quelle masse de roche sédimentaire, métamorphique ou ignée.* C'est la définition la plus utilisée dans les recherches et les travaux en lien avec l'hydrostratigraphie.

Quelques études ont proposé des méthodes pour identifier les hydrofaciès et les classer (Anderson, 1989; Klingbeil et al., 1999; Ezzy et al., 2006; Ouellon et al., 2008; Bayer et al., 2011). Il n'existe cependant pas de codification ou de classification reconnue pour les hydrofaciès comme c'est le cas pour les faciès sédimentaires. De plus, la corrélation des lithofaciès et des hydrofaciès est plutôt mal définie par les auteurs

précédemment cités. Seul Klingbeil et al. (1999) développent un peu plus ce lien entre lithofacies et hydrofacies. Les auteurs se concentrent sur une méthode de cartographie des affleurements quaternaires en termes de lithofaciès et d'une représentation des ensembles de données à l'égard de propriétés sédimentologiques et hydrogéologiques.

Plusieurs études ont porté sur la mise en place de méthodologies pour établir l'hydrostratigraphie d'un site spécifique, dont la géophysique et la géostatistique. La géophysique peut être utilisée pour délimiter les différents domaines hydrogéologiques(Heinz and Aigner, 2003), mais les conclusions insistent souvent sur le fait qu'il faut une combinaison et une intégration de différentes méthodes (p. ex., sédimentologique, géophysique, géochimique et morphostratigraphique) pour l'identification et la détection des unités hydrostratigraphiques. D'autres études ont utilisé la géostatistique appliquée à des forages(Weissmann et al., 1999). En effet, les ensembles de données hydrogéologiques comprenant des forages très espacés ne fournissent habituellement que des informations fragmentaires sur la répartition latérale des hydrofaciès. Cependant, la cartographie des dépôts de surface peut déceler des variations latérales notamment dans des systèmes d'aquifères alluviaux.

Les données les plus utilisées pour construire les modèles hydrostratigraphiques sont obtenues de forages. Dans certaines études, il a été possible d'établir en trois dimensions la continuité hydraulique des zones perméables et peu perméables dans des sédiments du Néogène(Macfarlane, 2009). Bien que les descriptions lithologiques puissent

être très différentes d'un forage à l'autre, les modèles construits à partir de ces données sont justes (Allen et al., 2008). La clé de la réussite d'un modèle hydrostratigraphique est la sélection de l'unité de base.

Depuis qu'Albinet et Margat (1970) ont introduit le concept de vulnérabilité de l'eau souterraine, surtout à la contamination, la communauté scientifique a démontré un intérêt grandissant à la protection des aquifères (Drew and Hötzl, 1999). Des études telles que celle de Gogu et Dassargues (2000) ont utilisé la modélisation numérique pour améliorer la protection des aquifères. Cet outil est économiquement avantageux et efficace. Les résultats de ces modèles numériques, lorsque suffisamment calés sur des données réelles mesurées permettent ensuite d'envisager des mesures de protection adéquates des aquifères. Il y a par contre quelques lacunes, notamment dans la transposition des données réelles vers un modèle numérique d'écoulement. La méthode de sélection et de regroupement des hydrofaciès est souvent différente d'une étude à l'autre. Puisque la clé de la réussite d'un modèle hydrostratigraphique est la sélection de l'unité de base (Macfalane 2009), la modélisation numérique produira donc des résultats différents en fonction de l'assemblage considéré.

1.3 OBJECTIFS

Le premier objectif est de développer une classification simplifiée d'hydrofaciès basée autant sur les données sédimentologiques que sur les propriétés hydrauliques des sédiments. Pour être utile, une classification doit donner l'information essentielle et être

applicable sur le terrain. La classification proposée servira alors de cadre à l'établissement d'unités hydrostratigraphiques.

Le deuxième objectif est d'étudier et d'analyser les effets de regroupement ou de subdivisions d'unités hydrostratigraphiques sur la précision des modèles numériques 3D d'écoulement souterrain. En effet, des modèles ni très simples ni très complexes sont ceux susceptibles de fournir les simulations les plus précises. De plus, trouver le meilleur niveau de complexité est un processus mal défini (Hill, 2006). Afin de limiter la complexité, le territoire d'étude ne renfermera qu'un faible nombre d'environnements sédimentaires. Toutefois, la méthodologie développée pourra éventuellement être appliquée à d'autres milieux.

1.4 MÉTHODOLOGIE

Pour arriver à élaborer une méthode de simplification pour la description hydrogéologique des dépôts meubles, il faut répondre à la question suivante : quels sont les éléments les plus importants à intégrer dans la nomenclature des hydrofaciès ?

Afin d'y répondre, il faut synthétiser et analyser les différentes pratiques dans la description de sédiments meubles qui peuvent être utilisés pour des applications hydrogéologiques. De nombreux auteurs (Bersezio et al., 1999; Klingbeil et al., 1999; Heinz and Aigner, 2003; Kostic et al., 2005) ont utilisé des nomenclatures et classifications pour caractériser les sédiments qui forment les aquifères. Comme mentionné

précédemment, il n'existe pas de nomenclature établie et reconnue internationalement pour les hydrofaciès comme il en existe pour les lithofaciès. Une nouvelle classification, se basant sur les propriétés granulométriques et hydrogéologiques des matériaux, sera proposée et appliquée à l'aquifère Mistouk situé dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec, Canada.

Le territoire d'étude est situé au nord du Lac-Saint-Jean entre la rivière Péribonka et la rivière Grand Décharge. Le bassin versant de la rivière Mistouk a été sélectionné, car il satisfait aux critères prédéterminés compatibles avec les différentes composantes de l'étude comme une épaisseur suffisante de dépôts et une grande variété d'unités stratigraphiques avec des répétitions dans les types de sédiments (Hudon-Gagnon et al., 2011). De plus, il existait une bonne quantité de données stratigraphiques et hydrogéologiques sur le territoire répertoriées dans la base de données du PACES-SLSJ. La plupart du territoire d'étude a été couvert par les sédiments déposés par l'ancienne mer de Laflamme. Des dépôts en eau profonde, principalement de l'argile massive ou stratifiée, sont couverts par des dépôts littoraux et pré-littoraux régressifs. Cependant, le principal environnement de dépôt dans cette région est un delta ou un prodelta qui a progradé du nord vers le sud sur l'argile profonde.

Concernant les degrés de simplification possibles et raisonnables à des fins de modélisation hydrogéologique d'un aquifère de type dépôt granulaire, il faut répondre à

cette question : quel outil est le plus adéquat pour la simplification des unités à modéliser et quel sera l'impact des simplifications sur l'exactitude des modèles ?

Pour les simplifications, le concept de la conductivité hydraulique équivalente permet de prendre en compte autant la géométrie des unités que la conductivité hydraulique propre à chaque unité, et ce dans les trois directions principales de l'écoulement souterrain (longitudinale, latérale et verticale). Le logiciel de modélisation et de simulation numérique *Feflow*[®] en combinaison avec des logiciels de géomatique permet de construire les différents modèles nécessaires et de réaliser les simulations numériques. Pour entamer le processus, un modèle hydrostratigraphique détaillé sera construit. Ce modèle sera ensuite simplifié en regroupant des unités et en leur assignant une conductivité hydraulique équivalente. Les conditions aux frontières resteront identiques dans chacun des modèles. Les résultats obtenus sont comparés entre eux ainsi qu'avec le modèle détaillé, et ce afin d'évaluer la pertinence et l'exactitude de chacune des simplifications réalisées.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres incluant celui-ci qui forme le premier chapitre. Le deuxième chapitre présente une étude comparative sur l'utilisation de l'hydrofaciès dans des études sédimentologiques et hydrogéologiques ainsi qu'une proposition de classification pour les hydrofaciès. Un article présentant la méthodologie de construction et de simplification hydrostratigraphique intitulé « *A hydrostratigraphic simplification approach to build 3D groundwater flow numerical models: example of a Quaternary deltaic deposit aquifer* » est ensuite présenté au chapitre 3. Finalement, la

conclusion résume les grandes lignes et les phases essentielles de cette recherche et propose une synthèse des résultats obtenus.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES HYDROFACIÈS

Les géologues et les hydrogéologues ont depuis longtemps convenu du besoin d'établir des méthodes systématiques et adéquates pour diviser les empilements de roches ou de sédiments en unités distinctes. Les bases et les concepts de la stratigraphie sont largement utilisés aujourd'hui en géologie pour répondre à plusieurs besoins scientifiques, sociaux et économiques. Le présent chapitre aborde les concepts de lithofaciès et plus spécifiquement de l'hydrofaciès en hydrogéologie. Une compilation des classifications communément utilisées a été effectuée. Les applications des lithofaciès et des hydrofaciès en hydrogéologie seront analysées et une nouvelle classification sera proposée.

2.1 FACIES, LITHOFACIES ET HYDROFACIES

Afin de proposer de nouvelles classifications des unités sédimentaires et hydrostratigraphiques, il est nécessaire de définir et de différencier les termes faciès, lithofaciès et hydrofaciès. Pour distinguer les différentes échelles d'observation, les termes faciès, association de faciès, succession de faciès et système de dépôts ont été intégrés au vocabulaire scientifique. Un faciès (Walker and James, 1992) est défini comme une unité de sédiments ou de roches sédimentaires caractérisée par une combinaison particulière de lithologies et de structures qui est différente des roches adjacentes.

L'association de faciès est un groupe de faciès reliés génétiquement l'un à l'autre et qui accorde une certaine importance à l'environnement de dépôts (Collinso, 1969). On peut aussi utiliser le terme élément architectural qui réfère à une géométrie en trois dimensions de l'association de faciès (p.ex., une barre de sable longitudinale d'une rivière). Le concept de succession de faciès (Walker and James, 1992) implique un changement progressif horizontal ou vertical d'une propriété, par exemple un empilement granodécroissant typique d'un remplissage progressif d'un chenal qui s'accompagne d'une réduction de l'écoulement et donc d'une réduction de la granulométrie du dépôt de la base au sommet. Le système de dépôt est défini comme un assemblage de lithofaciès en trois dimensions génétiquement liés par un processus actif ou inféré, et par un environnement spécifique par exemple, l'ennoiement d'une vallée par une remontée isostatique qui permet le développement d'un estuaire et de ses diverses parties (Posamentier, 1988). Lors d'une cartographie régionale, ce dernier niveau est privilégié pour représenter la tendance

générale et regrouper les différents matériaux retrouvés en domaines plus larges. Les codifications de faciès et d'association de faciès sont souvent adaptées au territoire d'étude et aux besoins.

La classification de Miall (1977) est largement utilisée pour décrire les différents environnements sédimentaires alluvionnaires et des versions adaptées aux besoins spécifiques d'autres études sont répandues (Eyles et al., 1983; Asprion, 1997; Aigner et al., 1998; Klingbeil et al., 1999). Étant donné que plusieurs aquifères sont situés dans de tels environnements sédimentaires, beaucoup d'études hydrogéologiques ont utilisé cette nomenclature pour décrire l'architecture des aquifères.

Le terme hydrofaciès sera utilisé dans cette étude pour une unité sédimentologique homogène ou une unité hydrogéologique homogène, mais pas nécessairement isotrope (Anderson, 1989), formée dans des conditions caractéristiques et qui peut ainsi posséder des propriétés hydrauliques caractéristiques. C'est cette définition qui sera utilisée dans le cadre de ce mémoire.

2.2 ÉCHELLES GRANULOMÉTRIQUES

La taille des grains est l'un des éléments les plus critiques dans la caractérisation hydrogéologique d'un sédiment. Or, plusieurs classifications granulométriques sont utilisées pour la description des sols selon le domaine d'étude (p.ex., géologie et génie civil) et selon les juridictions (p.ex, États-Unis d'Amérique, France, Québec). Des

différences sont présentes tant pour ce qui est de la nomenclature des particules que des limites critiques entre les classes de sédiments (Fig. 1).

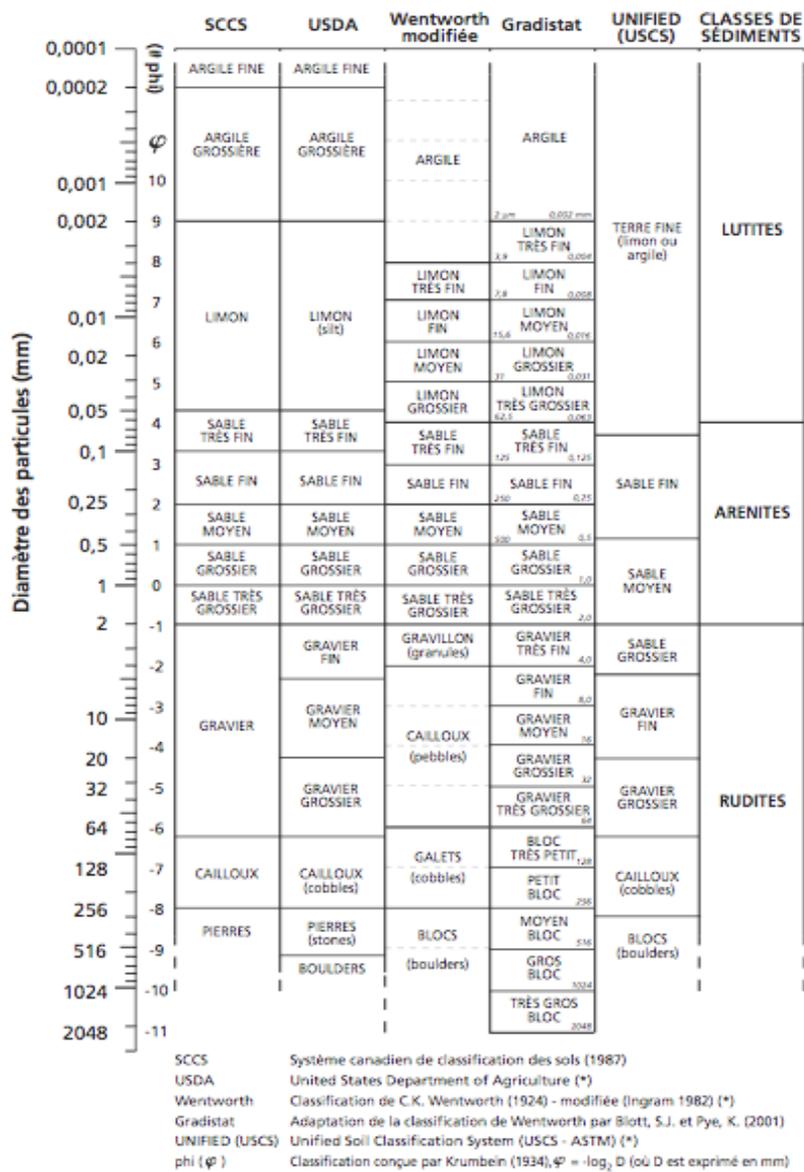


Figure 1 : Échelles et classifications granulométriques selon les différents types de nomenclatures existantes. Tableau réalisé par Daniel Cyr (Université du Québec à Montréal) à partir des travaux de Schoeneberger (2002)

Certaines valeurs critiques entre les classes de sédiments sont communes entre les différentes classifications. Par exemple, la discrimination entre l'argile et le silt (ou limon) est souvent établie à un diamètre de 0,002 mm qui marque la limite supérieure du domaine colloïdale, où les interactions et les échanges inter-particulaires sont dominants par rapport à l'action de la force gravitaire. La frontière entre les sables et graviers est quant à elle fixée à un diamètre de 2,0 mm avec l'hypothèse que les particules de diamètre inférieur à 2,0 mm sont assez petites pour rester collées les unes aux autres quand le matériau est humide. Les fractions plus grossières (cailloux, galets, blocs, etc.) ont une taille qui dépasse généralement un diamètre de 64 mm.

Des subdivisions dans les classes de sables et graviers sont essentielles, notamment en géotechnique, car elles permettent de distinguer les propriétés mécaniques des sables et graviers qui forment une forte proportion des dépôts meubles.

Une autre codification plus locale est celle du *Centre Géoscientifique du Québec* (Savard et al., 2007), qui est largement utilisée pour décrire les formations superficielles (Fig. 2). Elle est utilisée dans le cadre de forages destructifs, lesquels remanient les dépôts et ne permettent pas d'identifier les structures sédimentaires qui sont essentielles pour la classification en lithofaciès. Celle-ci comporte 8 classes ainsi que des subdivisions selon la granulométrie du matériel.

MATÉRIAUX	DESCRIPTEUR 1	DESCRIPTEUR 2	CODIFICATION	EXEMPLES DE COMBINAISONS
Blocs	B	—	<i>B</i>	
Gravier grossier	G	3 (Grossier)	G3	G3-S2
Gravier moyen		2 (Moyen)	G2	G2-S3
Gravier fin		1 (Fin)	G1	
Diamicton grossier / lâche	D	3 (Grossier)	D3	
Diamicton fin / compact		1 (Fin)	D1	
Sable grossier	S	3 (Grossier)	S3	S3-S2
Sable moyen		2 (Moyen)	S2	S2-F1
Sable fin		1 (Fin)	S1	
Silt sableux	F	2	F2	
Particules fines (silt et argile)		1	F1	F1-S1
Organique	O	—	<i>O</i>	
Remblai	X	—	<i>X</i>	
Roc	R	—	<i>R</i>	
Inconnu / indéterminé	IN	—	IN	

Figure 2 : Code abrégé du Centre Géoscientifique du Québec (Savard et al., 2007)

2.3 LE LITHOFACIÈS DANS LES APPLICATIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Étant donné que les aquifères constitués de sédiments non consolidés sont décrits par des propriétés sédimentologiques (lithofaciès), beaucoup d'études hydrogéologiques ont utilisé cette nomenclature pour décrire l'architecture des aquifères. Quatre études ont été examinées et comparées pour étudier certaines utilisations des lithofaciès dans des applications hydrogéologiques.

Bersezio et al. (1999) ont testé l'influence de l'hétérogénéité sédimentaire sur le comportement anisotrope de l'aquifère à différentes échelles. La zone d'étude était une

carrière de sable et gravier du Quaternaire qui est située dans des unités fluvioglaciaires et glaciolacustres dans un environnement deltaïque. Une large gamme de lithofaciès (15) a été cartographiée, partant du limon massif (Fsm) au diamicton (Dmm).

Les lithofaciès ont été subdivisés en unités de texture. Une unité de texture est un lit individuel ou une partie du lit lui-même qui montre une caractéristique particulière (granulométrie, structure, etc.). Pour chaque unité de texture, une estimation de la conductivité hydraulique a été spécifiée en utilisant la granulométrie. Les unités de texture dans les lithofaciès peuvent avoir une large gamme de valeurs de la conductivité hydraulique, soit de 1 à 3 ordres de grandeur.

L'étude de Klingbeil et al. (1999) se concentrait sur une méthode de cartographie des affleurements quaternaires en termes de faciès lithologiques et la représentation des ensembles de données à l'égard de propriétés sédimentologiques et hydrogéologiques. La zone d'étude, située en Allemagne, était constituée de dépôts quaternaires provenant des eaux de fonte du glacier Rhine. En utilisant la base de la classification de Miall (1977), 23 lithofaciès ont été cartographiés. Il ajoute dans sa classification le concept de bimodalité (fraction médiane non présente, seulement les particules fines et grossières) et de structure ouverte (de fin à grossier). Ces deux aspects rappellent l'importance du tri dans la caractérisation hydrogéologique des lithofaciès.

Heinz et Aigner (2003) ont quant à eux utilisé le concept de la stratigraphie dynamique hiérarchique dans un but hydrogéologique. L'approche de la stratigraphie hiérarchique dynamique (Miall et al., 1991; Aigner et al., 1998) intègre des outils et des concepts venus de toute l'échelle, à partir de la particule jusqu'au remplissage du bassin. L'objectif était d'étudier les relations entre les sédiments hétérogènes fluvioglaciers et leurs propriétés aquifères.

Cinq lithofaciès majeurs ont été identifiés dans les dépôts de graviers fluvioglaciers du sud-ouest de l'Allemagne ; des « sables purs (Sx ; sable stratifié) et des « graviers bien triés » (GS-x ; gravier sableux stratifié) transportés lors de faibles débits, à débits plus importants, il y a des graviers granoclassés produits par des fluctuations du débit (Gcg,a ; gravier jointif granoclassé), des « feuillets de charge de fond par écoulement dilué » (Gcm ; gravier jointif massif) et des « graviers représentant un tapis de traction par écoulement dense » (bGcm ; gravier à blocs, jointif et massif). Les lithofaciès sont principalement jointifs (c.-à-d., les fragments se touchent et ne flottent pas dans la matrice) et montrent une dominance de la fraction de gravier (70-85%), tandis que la portion de matrice de sable est souvent inférieure à 30%. Des mesures de la conductivité hydraulique (essais pneumatiques et distribution granulométrique) ont été réalisées lors de travaux antérieurs dans la zone d'étude. Avec des valeurs de conductivité hydraulique, les lithofaciès ont été divisés en 12 hydrofaciès. La répartition des lithofaciès a également été utilisée pour caractériser les éléments de dépôt qui ont été intégrés pour la construction hydrostratigraphique.

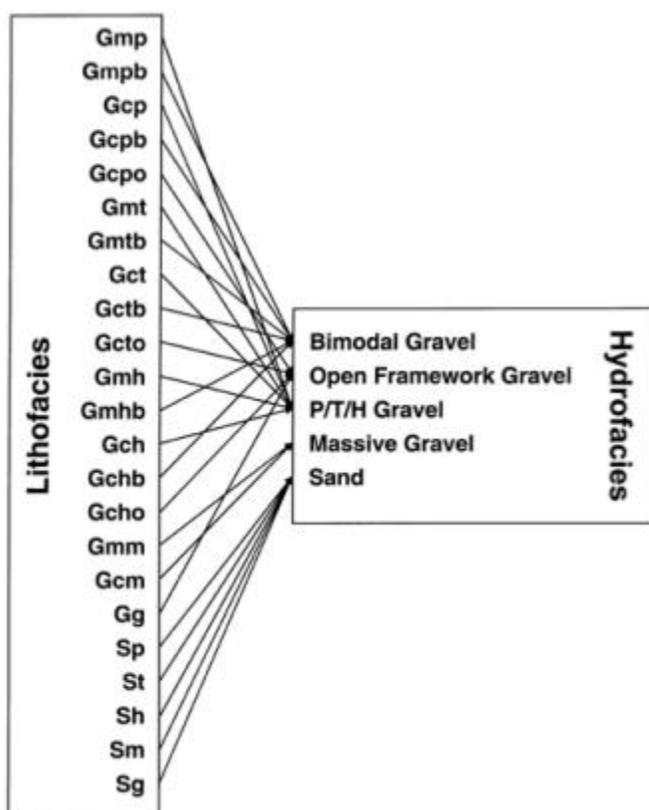
L'étude de Kostic et al. (2005) se concentrait sur (1) l'analyse des lithofaciès dans des sections d'affleurement, (2) la cartographie 3D de l'architecture basée sur le géoradar, sur des carottes de sédiments et sur des données de tomographie dans des puits, et (3) la modélisation 3D de la conductivité hydraulique dans l'aquifère reposant sur un modèle à haute résolution sédimentaire. D'après les données d'affleurements et de carottes, sept lithofaciès ont été identifiés et interprétés. Avec la compréhension de la genèse des sédiments à l'esprit, un modèle sédimentaire 3D à haute résolution de l'aquifère a été développé en intégrant des données des affleurements, des carottes de sédiments, du géoradar, de la tomographie et du débitmètre.

En résumé, les codes de lithofaciès sont modifiés en accord avec le type de sédiments retrouvés dans une zone d'étude. Le code de lithofaciès donne des informations (taille des grains et structure) sur les sédiments. La codification décrit les compositions et les textures sédimentaires, mais pas nécessairement les propriétés hydrauliques.

2.4 L'HYDROFACIÈS DANS LES APPLICATIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Beaucoup d'études hydrogéologiques ont utilisé les hydrofaciès pour décrire l'architecture des aquifères. Quatre études ont été examinées et comparées pour étudier certaines utilisations des lithofaciès dans des applications hydrogéologiques.

L'étude de Anderson et al. (1999) avait comme objectif de chercher des moyens de quantifier l'hétérogénéité de l'aquifère. Pour les auteurs de l'étude, une approche sédimentologique est qualitative alors qu'une approche quantitative est hydrogéologique. La zone d'étude était une large plaine d'épandage mise en place à la fin de la glaciation Wisconsinienne. Onze (11) lithofaciès ont été distingués sur la base de la taille des clastes dominantes, du tri, des structures sédimentaires et des frontières externes. Par la suite, les lithofaciès ont été regroupés en sept (7) hydrofaciès et cartographiés à l'aide de la photomosaïque, de profils de géoradar et de croquis des affleurements réalisés sur le terrain. La conductivité hydraulique des hydrofaciès est basée sur la taille moyenne des



grains. Selon les auteurs, c'est le contraste de conductivité hydraulique qui est important et non les valeurs absolues de celle-ci.

Tel que présenté dans la section précédente, Klingbeil et al. (1999) se concentrent sur une méthode de cartographie des affleurements quaternaires en termes de faciès lithologiques et la représentation des ensembles de données à l'égard de propriétés sédimentologiques et

Figure 3 : Relation entre les lithofaciès et les hydrofaciès (Klingbeil and et al., 1999)

hydrogéologiques. Les vingt-trois (23) lithofaciès identifiés sont classés en cinq faciès différents avec une signification hydrogéologique (hydrofaciès). Ils sont principalement distingués par la granulométrie et la structure : (1) gravier bimodal, (2) gravier à structure ouverte, (3) gravier à stratification horizontale/planaire/auge, (4) gravier massif et (5) sable. Les hydrofaciès peuvent comprendre différents lithofaciès, mais un type spécifique de lithofaciès ne peut appartenir qu'à un hydrofaciès.

Bayer et al. (2011) ont réalisé une cartographie dans une gravière pendant son exploitation. Il a donc été possible d'obtenir une représentation tridimensionnelle des sédiments. Les lithofaciès ont été caractérisés par la taille de grains, le tri, la sphéricité, la composition de particules, la structure et la présence de stratifications. Quatre (4) lithofaciès ont été identifiés : (1) gravier mal trié non jointif (Gcm), (2) gravier alternant avec du sable (Gcg,a), (3) sable et gravier bien trié (GS-x) et (4) sable bien trié et pur (S-x). Les différents lithofaciès sont par la suite caractérisés en termes de paramètres hydrogéologiques. Les faciès avec une perméabilité et une porosité semblables ont pu être fusionnés. Dans le cas présent, certains lithofaciès (le gravier mal trié et le gravier alternant) ont été subdivisés pour tenir compte des particularités présentes dans chacun des lithofaciès. La nomenclature suit celle des lithofaciès.

Dans l'étude de Ouellon et al. (2008), les hydrofaciès sont définis comme un matériau granulaire avec une taille de grain similaire ainsi que des propriétés hydrauliques et mécaniques similaires. L'hétérogénéité du système aquifère deltaïque de Valcartier

(Québec) a été étudiée pour connaître son influence sur le transport d'un contaminant présent dans ce secteur, le trichoroéthylène (TCE). L'hétérogénéité est définie par la distribution des hydrofaciès et de la conductivité hydraulique. À partir de la classification du Centre Géoscientifique du Québec (voir section 2.3), les faciès sont regroupés en hydrofaciès numérotés de 1 à 5. Le regroupement final a été fait pour obtenir un nombre suffisant d'observations pour représenter chaque hydrofaciès, ainsi qu'une distribution et une moyenne de la conductivité hydraulique distincte pour chaque hydrofaciès.

Ezzy et al. (2006) ont construit un modèle numérique d'écoulement à partir de la distribution des hydrofaciès identifiés sur le terrain et à l'aide du géoradar. Six (6) hydrofaciès sont étiquetés de A à F sur la base de l'analyse granulométrique, de la comparaison des valeurs de la conductivité hydraulique obtenues à partir d'essais de pompage et des mesures en laboratoire. Ces hydrofaciès ont été ensuite utilisés dans un modèle numérique d'écoulement.

En résumé, pour la majorité des auteurs, les hydrofaciès sont utilisés pour fusionner plusieurs lithofaciès en une unité afin de simplifier la représentation des propriétés hydrauliques des sédiments. Parfois, les hydrofaciès sont utilisés pour délimiter plusieurs propriétés hydrauliques dans un lithofaciès. Cela dépend principalement de l'usage qui est fait de la classification des hydrofaciès et du degré d'hétérogénéité présent. Lettres, chiffres et codes de lithofaciès sont utilisés pour nommer les hydrofaciès. Ces classifications ne

nous donnent pas les propriétés hydrogéologiques (conductivité hydraulique et/ou porosité) des hydrofaciès.

2.5 PROPOSITION DE CLASSIFICATION DES LITHOFACIES ET HYDROFACIES

La grande problématique dans l'assemblage des hydrofaciès est la correspondance entre les différentes échelles et classifications. L'hydrofaciès se doit d'être homogène en perméabilité, mais pas nécessairement pour ce qui est de la composition du matériel. Étant donné que la majorité des hydrofaciès sont formés à partir des lithofaciès, il faut d'abord normaliser les codes des lithofaciès afin d'obtenir des hydrofaciès cohérents.

2.5.1 LITHOFACIÈS

Pour les lithofaciès, il est reconnu que chacun peut adapter la classification dans le but de faire un classement ajusté pour le type de sédiments présents dans la zone d'étude. Les lithofaciès peuvent donner une approximation des propriétés hydrauliques des sédiments, mais cette approche est plus qualitative que quantitative. Deux facteurs principaux influencent les propriétés hydrogéologiques dans les sédiments non consolidés: la granulométrie et le tri. Il est donc proposé d'ajouter un indice pour la taille des grains puisque celle-ci est l'une des variables les plus importantes pour caractériser les propriétés hydrogéologiques des sédiments et qu'elle varie souvent à travers un lithofaciès. Les divisions granulométriques sont basées sur le système « Unified Soil Classification System

(USCS) » (ASTM, 2011). Le tableau 1 présente la nomenclature/classification des lithofaciès proposés. Un indice (f, m ou g) est ajouté à chaque taille des grains principale (G, S ou F). Ainsi un gravier fin sera G_f , un sable grossier S_g et une argile F_f . Les textures et structures sont par la suite ajoutées. Voici quelques exemples :

- S_{mh} : Sable moyen avec laminations horizontales.
- $G_m S_{fm}$: Gravier moyen avec sable fin non jointif (supporté par la matrice).
- F_{fm} : Argile massive.

Tableau 1 : Classification et nomenclature proposée des lithofaciès

Indice	Abréviation
I ₁ Taille des grains principale	G Gravier S Sable F Fines (argile et silt)
i ₁ Taille des grains secondaire	f Fin m Moyen g Grossier
I ₂ Texture (gravier)	c Jointif (Supporté par les clastes) m Non-jointif (Supporté par la matrice)
I ₃ Stratification	p Planaire a Auges h Horizontale m Massive g Granoclassée r Ride e Lamination entrecroisée
I ₄ Information complémentaire	i Imbrication a Alternance o Fabrique ouverte b Bimodale

La figure 4 présente une application de cette classification sur une photographie panoramique d'une coupe (nommée STMN002) dans la région de Sainte-Monique au Saguenay-Lac-Saint-Jean.



Figure 4 : Coupe STMN002 interprétée à l'aide de la classification proposée

2.5.2 HYDROFACIÈS

Le concept d'hydrofaciès peut servir à diverses applications. Principalement, les hydrofaciès sont utilisés pour caractériser les conditions hydrogéologiques de l'environnement étudié; ils sont aussi utilisés en modélisation et simulation numérique de l'écoulement. Dans ce genre d'étude, les hydrofaciès sont utiles pour dresser un portrait de la distribution souterraine des propriétés hydrogéologiques tout en définissant la conductivité hydraulique (K) de ces unités.

L'examen des études utilisant les hydrofaciès a montré que la nomenclature des hydrofaciès n'est pas la même d'une étude à l'autre. C'est un grand contraste avec la nomenclature des lithofaciès, qui est bien développée et adaptée pour de nombreux types de sédiments. Cette nomenclature permet au lecteur d'identifier la lithologie (la granulométrie et la structure) avec un maximum de 3 ou 4 lettres. Plusieurs études utilisent la nomenclature des lithofaciès pour nommer les hydrofaciès. Étant donné que les lithofaciès incluent une composante structurelle, il devient très difficile de définir un lithofaciès lors de travaux destructifs (ex. forage). Il est donc proposé de classer et de nommer les hydrofaciès tout d'abord avec la taille des grains et d'ajouter un indice pour la perméabilité (Tableau 2). Il serait alors plus facile d'identifier les propriétés hydrogéologiques de l'hydrofaciès qui sont la définition même d'un hydrofaciès.

Tableau 2 : Classification proposée des hydrofaciès

Taille des grains		Indice de perméabilité	Valeur de conductivité hydraulique K (m/s)
F- Argile et Silt	+	1	10^{-13} à 10^{-10}
		2	10^{-9}
S - Sable		3	10^{-8}
		4	10^{-7}
G- Gravier		5	10^{-6}
		6	10^{-5}
B - Bloc		7	10^{-4}
		8	10^{-3}
		9	10^{-2}
		10	10^{-1}

Selon cette classification et après une mesure de la conductivité hydraulique, les lithofaciès identifiés dans STMN002 (Figure 4) pourraient être transformés en hydrofaciès :

- Gravier fin avec sable moyen massif ($G_f S_m m$) → GS-7
- Gravier moyen avec sable fin à laminations ($G_m S_f l$) → GS-7
- Sable moyen à laminations inclinées ($S_m i$) → S-6
- Sable moyen avec gravier à laminations horizontales ($S_m G_g h$) → SG-6

Les lithofaciès identifiés sur le terrain (notamment dans les sablières et gravières) peuvent difficilement être associés aux identifiants lithologiques provenant de forages destructifs, source principale des données disponibles pour la construction de modèles stratigraphiques. Ainsi, l'utilisation des hydrofaciès lors de la construction de modèles numériques permet de synthétiser l'information en combinant les observations terrains et les données disponibles, en plus de caractériser la nature hydrogéologique des sols.

CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION ET DE SIMPLIFICATION HYDROSTRATIGRAPHIQUE

Ce chapitre contient un article intitulé «A hydrostratigraphic simplification approach to build 3D groundwater flow numerical models : example of a Quaternary deltaic deposit aquifer» présente une analyse des effets de simplifications hydrostratigraphique sur la précision de modèle numérique d'écoulement 3D. Il a été publié en date du 29 avril 2015 dans la revue *Environmental Earth Sciences* : DOI 10.1007/s12665-015-4439-y.

A hydrostratigraphic simplification approach to build 3D groundwater flow numerical models: example of a Quaternary deltaic deposit aquifer

Etienne Hudon-Gagnon, Romain Chesnaux, Pierre A. Cousineau, Alain Rouleau

Département des sciences appliquées, Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), 555

Boulevard de l'Université, Chicoutimi, Québec, Canada

Abstract

The construction of 3D hydrogeological models for unconsolidated sedimentary aquifers remains particularly challenging, especially in Quaternary deposits. Simplifications at small or large scale are part of groundwater flow modeling and are often required due on the usual inherent complexity of the stratigraphic systems. This study analyses the effects of hydrostratigraphic simplifications on the accuracy of 3D numerical groundwater flow models. Such investigation is conducted from an initial detailed model of an aquifer located in the Saguenay-Lac-St-Jean (SLSJ) region in Canada and the considered simplifications are based on using the equivalent hydraulic conductivity concept. Different levels or approaches of simplification are applied to numerical simulated models and the results of the different scenarios are compared. A Root Mean Square (RMS) calibration result of 3,79 m on the groundwater levels is obtained for the most detailed model, while the RMS ranges between 4,01 m and 4,83 m with the simplified models. Such results illustrate a gain obtained in the calibration of the model with increasing level of hydrostratigraphic details, but that this gain is relatively limited. The proposed methodology for simplifying the

hydrostratigraphic settings could be used by hydrogeological modellers for a wide variety of aquifers constituted of sedimentary granular material.

Résumé

La construction de modèles hydrogéologiques 3D pour les aquifères de sédiments non consolidés reste un défi important, particulièrement pour les dépôts quaternaires. Des simplifications, à différents niveaux d'échelles sont nécessaires en modélisation des écoulements souterrains à cause de la complexité des systèmes hydrostratigraphiques. Cette étude s'intéresse à évaluer les effets de simplifications hydrostratigraphiques sur la justesse des modèles numériques d'écoulements d'eau souterraine. Une telle investigation est menée à partir d'un exemple de modèle initial bien détaillé d'un aquifère localisé dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ) au Canada et les simplifications qui sont ensuite effectuées se basent sur le concept de la conductivité hydraulique équivalente. Différents niveaux de simplifications sont appliqués aux modèles numériques et les résultats obtenus des différents scénarios sont comparés entre eux. Un calage des simulations numériques par l'erreur quadratique moyenne (EQM) conduit à une EQM de 3,79 m sur les charges hydrauliques pour le modèle à plus haut niveau de détail alors que des valeurs comprises entre 4,01 m et 4,83 m sont obtenues pour les modèles simplifiés. Ces résultats illustrent le fait que le gain obtenu sur la justesse (calage avec l'EQM) des modèles en fonction des degrés de simplifications stratigraphiques qui sont considérés reste limité. La méthodologie qui est proposée pour réaliser les simplifications hydrostratigraphiques pourrait être utilisée

par les hydrogéologues praticiens pour un large éventail de contextes d'aquifères granulaires.

Introduction

A significant amount of groundwater resources is located in superficial granular aquifers overlying the bedrock. These aquifers generally consist of bedded sediments (sand, gravel and clay) and they can be very heterogeneous regarding their granular composition as well as their hydraulic conductivity (K). Such heterogeneity obviously plays a major role in controlling the groundwater flow patterns. Therefore, the construction of 3D hydrogeological models for sedimentary aquifers, requiring to detect, to measure and to take into account as much as possible that heterogeneity, remains a major challenge for the modellers.

Using 3D groundwater flow models is now a common practice, even though the reconstruction of the hydrostratigraphic architecture of aquifers is usually not a simple task (Ross et al., 2004). Various tools have been proposed and tested to establish a satisfying hydrostratigraphy for those models, including field observations (Klingbeil et al., 1999; Weissmann et al., 1999) and geophysics (Heinz and Aigner, 2003; Sharpe et al., 2003). However, the community of modellers agrees that a suitable approach for building hydrostructural models should combine and integrate multiple methods of investigation (e.g. sedimentology; geophysics, geochemistry and morphostratigraphy). This multidisciplinary is necessary in order to detect, identify and delineate the different hydrostratigraphic units. Such holistic approach is largely used for building 3D models by

assembling borehole data as well as geophysical data. Although lithological descriptions may vary from one hole to the next and there is no consistent methodology for reconstructing and representing such actual variations, developing models is justified (Allen et al., 2008) as long as the models tend to provide the highest level of representativity of the system.

The scientific community has shown a growing interest in the protection of aquifers (Drew and Hötzl, 1999) since Albinet and Margat (1970) introduced the concept of vulnerability of groundwater. Studies, such as that of Calvache et al. (2009), used numerical modeling as a cost-effective tool to improve the protection of aquifers. The results of numerical models, when properly calibrated on the actual observed data, can be used as a decision-making tool for a proper management of groundwater resources.

The accuracy targeted for a numerical model is directly related to the purpose and the use to be made of the model. For example, a model designed for the simulation of contaminant transport may require a high level of accuracy and therefore may need to be based on a large amount of hydrostratigraphic information. This may be different for a model aimed at regional management purposes, such latter model requiring a lower level of accuracy. However, in any case, numerical groundwater flow models cannot pretend to dress a real picture of the subsurface and hydrogeological processes because they are limited by the efficiency of the investigation tools, their costs and also probably because of our inadequate understanding of the groundwater systems. Consequently, various degree of simplification is required, and this must be conducted in a reasonable and appropriate manner as an integral part of groundwater flow modeling. As recently stated by Doherty (2011)

“Learning how to define and locate the optimal compromise between simplicity and complexity is one of the biggest problems facing current modeling practice”.

The main purpose of the presented study consists of analyzing the effects of hydrostratigraphic simplifications on the accuracy of 3D groundwater flow numerical models using the example of a large aquifer constituted of sedimentary granular material. This site is particularly relevant considering the complexity and the diversity of the nature of the different layers constituting the granular deposits. The simplifications are considered from a detailed hydrostratigraphic model of the aquifer following the equivalent hydraulic conductivity concept (Leonards, 1962). Few studies have used the equivalent hydraulic conductivity concept except Sepúlveda and Kuniansky (2009). Since neither very simple nor very complex models are likely to provide the most accurate predictions (Hill, 2006), it is proposed that the impact of the degree of simplification of a model needs to be investigated by comparing the results obtained using different simplification degrees, in order to define which degree may be satisfying for the modeller. Existing data (obtained from boreholes, consultant reports, digital elevation model, etc.) and new data (obtained from boreholes, outcrop analyses, ground-penetrating radar and particle size analyses) are used to build the detailed model of the Mistouk aquifer in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region. The different developed models present a layer-cake geometry where layers are hydrofacies. A hydrofacies is commonly defined as an homogeneous sedimentological unit characterized by its homogenous porosity and permeability but not necessarily isotropic (Anderson, 1989). Using numerical modeling, the results of different levels of simplification are presented and compared. Indeed, the study illustrates how numerical

modeling can assess how acceptable a hydrostratigraphic system can be simplified to obtain satisfactory results with limited loss of the actual hydrogeological conditions.

Study site

The watershed of the Mistouk River (Figure 1) is located in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region (Province of Quebec, Canada) and is selected for this study because it satisfies the pre-determined criteria compatible with the various components of the study such as a sufficient thickness and a large variety of stratigraphic units with repetitions in the types of sediments (Hudon-Gagnon et al., 2011). Also required was a certain amount of previously

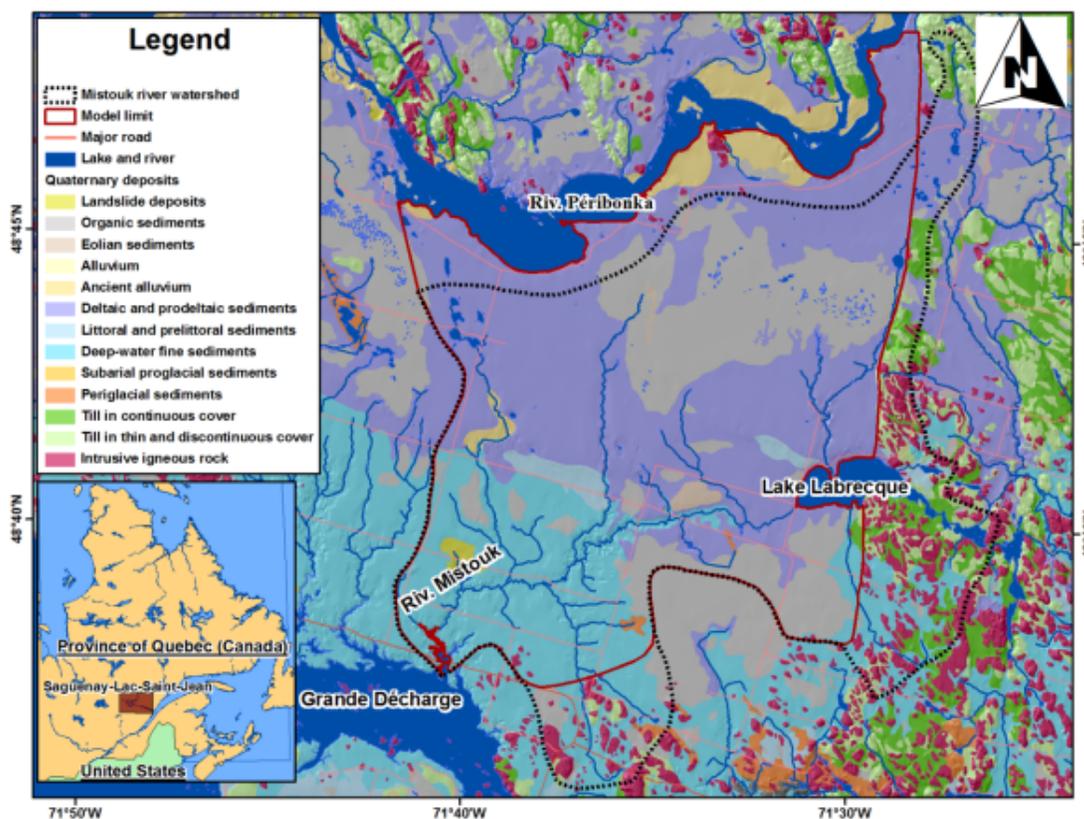


Figure 1 : Study area with the surficial geology map of the Quaternary. The limits of the Mistouk River and of its watershed as well as the limit of the numerical model are shown.

conducted stratigraphic analyses (borehole data logging, outcrop compilation, geophysical analyses, etc.) and sufficient hydrogeological data (pumping tests, in-situ permeability test, grain-size analyses, etc.).

The Mistouk River watershed is located northeast of the Lake-Saint-Jean between the west-flowing Péribonka and the Grande Décharge rivers. It is bordered to the east by a regional rock basement structure called the Kenogami Uplands. The total basin area is 210 km² and is predominantly occupied by forest, agricultural and urban areas. Two municipalities located in the sector Labrecque (population of 1215) and L'Ascension (population of 1983) use groundwater for their supplies. The thickness of the Quaternary deposits varies between 0 and 180 m in this area.

The glacial history of the region is important because it produced the majority of the depositional environments and sediments of the study area (Figure 1). The sediments are entirely Late Wisconsinian in age and the resulting stratigraphy is rather simple. The ice cap that covered the region during the Wisconsinian glaciation was flowing in a direction generally south. The Monts-Valin acted partly as an ice-divider with ice on the east-side flowing towards the Saint-Lawrence River, and west flowing towards the Lake Saint-Jean (Gadd, 1988); upper reaches of North-South oriented U-shaped valleys may have funnelled local ice streams. The continental glacier retreated from the highlands of the region about 10 000 years ago leaving several glacial outwashes. The deglaciation continued in the lowlands from east to west along the graben of the SLSJ region and northward from the lake Saint-Jean for the final stages of the deglaciation.

Quaternary deposits cover the Precambrian crystalline bedrock, which is mainly composed in the study area of anorthosite. Ice retreat was swiftly followed by a marine transgression and the formation of a nearly landlocked sea, known as the Laflamme Sea, connected to the open sea by a long fjord. The stratigraphic succession begins at the base, with tills whose thickness can reach up to 10 m with boulders and pebbles from the Precambrian basement. Locally fluvial-glacial outwash and ice contacts deposits lie directly above the bedrock and consist of laminated sand and gravel with boulders of Paleozoic limestone and shale. These two types of sediment mostly crop out in the eastern, rocky part of the study area (fig 1). Most of the study area was covered by sediments deposited by the ancient Laflamme Sea. Marine deep-water deposits, mainly massive or stratified clay, are covered by regressive littoral and pre-littoral deposits. However, the main depositional environment in this region is a delta or a prodelta which prograded from the north to the south over the deep-water clays without totally covering them. These deltaic sediments (silt, sand and gravel) formed at the outlet of a paleo-Péribonka River that probably flowed through that sector. The uppermost units consist of alluvial deposits restricted along active major streams, eolian sediments that superficially remobilized the surface of the deltaic deposits, and peat deposits mostly formed also on the deltaic deposits. For this study, only the unconfined aquifer overlying the deep-water clays will be considered for the regional model.

Methodology

Site data collection

In order to construct a numerical 3D groundwater flow model of the Mistouk aquifer, existing data have been gathered and compiled. In addition, extensive fieldworks have been conducted to complete this information and satisfy our needs. LaSalle and Tremblay (1978) established a map of the surficial geology of the Quaternary deposits of the SLSJ region. However, such map had never been updated and was produced at a scale that is not sufficient for detailed hydrogeological investigations. In 2009-2010, new maps of surficial deposits (Figure 1) of the Saguenay-Lac-Saint-Jean region was realized (Daigneault et al., submitted in 2011) that used the standardized descriptions developed by the Geological Survey of Canada (Parent et al., 2009). In the study area, the map sheet was mainly used to estimate the recharge of the aquifer but also to delineate major units of the model such as the clay.

Borehole stratigraphy is an essential component in the construction of 3D models. In the SLSJ region, the regional project of the Groundwater knowledge acquisition program (*Programme d'Acquisition de Connaissances sur les Eaux Souterraines; PACES-SLSJ*) has established a groundwater geodatabase of that region after the compilation of existing and new hydrogeological data (Chesnaux et al., 2011). Such a database contains borehole logging and hydraulic testing information, and hydrogeochemical data among other relevant hydrogeological information. A total of 247 stratigraphic records were initially available in and around the Mistouk aquifer (location of the private wells in Figure 2). All

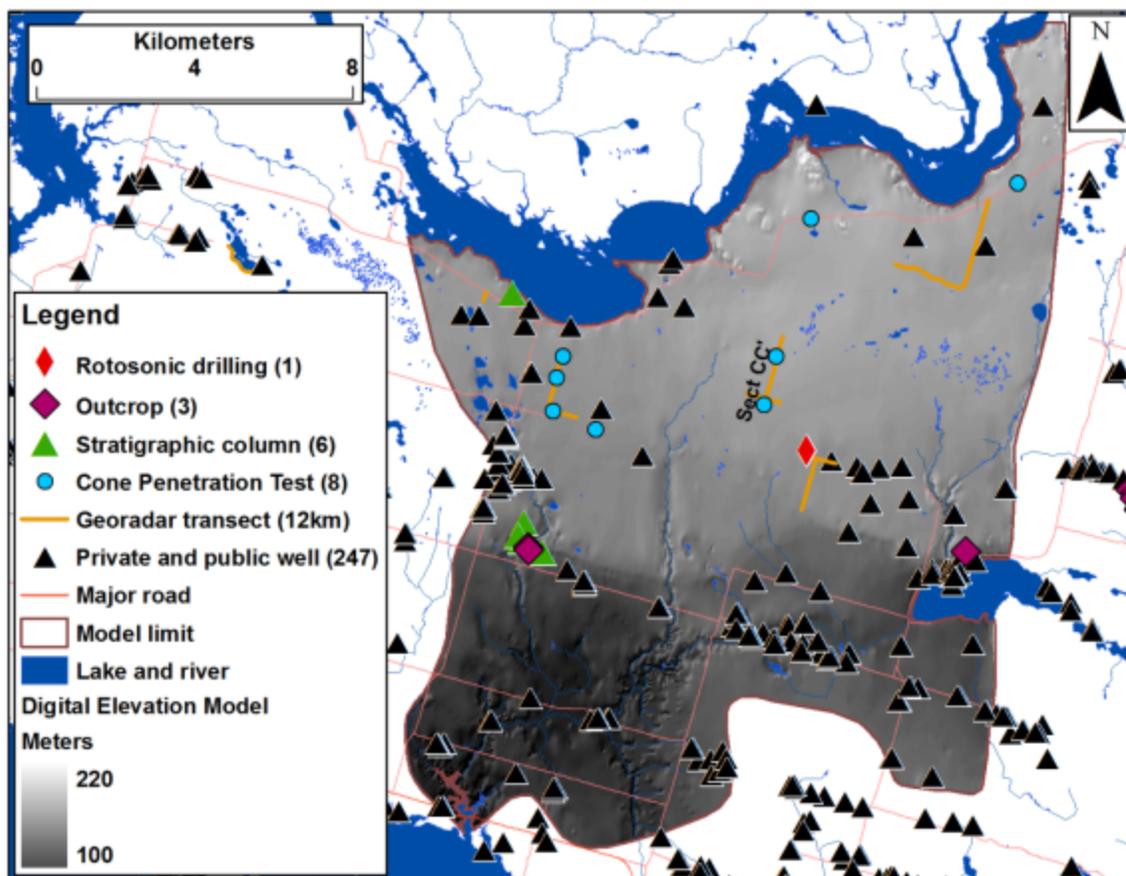


Figure 2 : Distribution of the existing and new collected data superposed over the Digital Elevation Model (DEM) with a precision of 10 m.

the descriptions were filtered and standardized following the GSC code (Savard et al., 2007).

The spatial distribution of the borehole data in the study area was however not optimal. This distribution has been improved using four different tools to acquire new information. First, detailed stratigraphic sections were constructed and 2-D lithofacies relationships were established from panoramic photos taken of different gravel pit walls. This sedimentological approach in combination with hydrogeological parameter estimation provides a good basis for simulations of groundwater flow and contaminant transport

(Klingbeil et al., 1999). Furthermore, three sites were sampled for grain size analyses, and 6 stratigraphic columns were produced to build the numerical model.

A campaign of georadar was coupled with a Cone Penetrating Test (CPT) survey to cover the zones where there was few or no data available. The georadar used was a Pulse EKKO pro with 100 MHz antennas distant of 1 m each other. The drill used to conduct the CPT tests was a Geotech 605D. A total of 8 CPTs and 12 km of georadar were completed (Figure 2). Finally, 64 m of core sediments (from surface to bedrock) were logged from a rotosonic drill in the center of the aquifer (Figure 2). In addition to the many samples taken during drilling, the CPT provided a detailed and reliable stratigraphic column. The nature of the reflectors and units identified in the georadar sections was correlated to the units identified in the CPT.

Grain size analysis is extremely useful in this context as it helps understanding lithological and hydrogeological heterogeneity in Quaternary sediments (Bersezio et al., 1999). Throughout the stages presented above, sediment samples (45) were collected by various means such as split-spoon, boreholes and shovel samples in sand and gravel pits (Figure 2). All samples were sieved to establish their grain-size curve. These analyses enabled to (1) better characterize the Quaternary sediments and (2) use grain size-based empirical equations to determine the hydraulic conductivity of hydrofacies.

3D hydrostructural models construction

An inventory of the lithofacies sequences was carried out to establish the hydrostratigraphy of the aquifer. A compilation of the vertical positions of the facies was conducted to determine their successions and arrangements. Then, the different horizons are defined in each stratigraphic record from defining the positions of the contacts between two different units. Indeed, each horizon is finally extended by kriging interpolation (Matheron, 1969) using the position of the contacts. A Digital Elevation Model (DEM), with a vertical precision of 10 m, is used to model the ground surface (top of the first layer).

After the 3D structural model is established, the hydraulic properties of the different layers of the model must be established. The concept of equivalent hydraulic conductivity adopted by Leonards (1962) is used in this study for testing different scenarios of simplification of the multi-layered system. This method of simplification offers multiple advantages; first the analytical calculation is easy to operate, this method can take into account the anisotropy of layered media such as observed in a paleo-delta and finally this approach allows to take into account the geology of the site by regrouping layers with specific criteria (e.g. source, facies associations/successions or architectural elements). The calculation of the equivalent hydraulic conductivities in the three spatial directions is described in the two following equations (Equations 1 and 2).

$$Kz_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^M b_i}{\sum_{i=1}^M b_i / Kz_i} \quad \text{Eq. 1}$$

$$Kx_{eq} = Ky_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^M b_i (Kx_i, Ky_i)}{\sum_{i=1}^M b_i} \quad \text{Eq. 2}$$

where Kx_{eq} , Ky_{eq} and Kz_{eq} are respectively the equivalent hydraulic conductivity in the x, y and z directions. Kz_i is the vertical hydraulic conductivity, Kx_i and Ky_i the horizontal hydraulic conductivity and b_i is the thickness of Layer i , and M is the total number of layers in the multi-layered system considered.

With those equations a multi-layered groundwater flow system can be transformed into an equivalent few layers or even into a single-layer groundwater flow system. These relations are normally used to simplify a 2D horizontal organisation of layers. In this study, it was used to merge certain layers of a model into a single layer by calculating the equivalent hydraulic conductivity on the nodes in order to simplify the model and then to test the influence of such simplifications on the results obtained for the different scenarios. This method normally applies when layers are horizontal and have uniform lateral thickness. It was assumed that the variations in the thickness of the different layers of the aquifer are negligible. Considering the large extension of the model, this assumption is reasonable. In addition, the field data do not allow defining variations of the permeability tensor; trying to integrate such variations is inappropriate because it would conduct to inaccurate results

considering the large scale of the model and the lack of local accuracy in the available tools to assess possible variability of the permeability tensor at local scales.

Groundwater flow models

Groundwater pumping from private wells is neglected in the regional groundwater flow model developed in this study, considering that these pumping rates are negligible at a regional scale and furthermore, that these values are not accurately known. Consequently, only the pumping rates of the municipal wells have been considered in the models. The Mistouk aquifer has various hydraulic boundaries. The watershed of the Mistouk River is considered to delineate the boundaries of the aquifer given that the surface water divide is often a boundary between groundwater basins (Schwartz and Zhang, 2003). However, two modifications are made in regard to the hydrostratigraphic configuration. Firstly, the northern limit of the aquifer was stretched to the Péribonka River since the aquifer is certainly connected to this river (Dessureault, 1975). Secondly, the western limit of the aquifer was positioned along the Kenogami Uplands because the bedrock is taken as an impermeable limit considering the high contrast of hydraulic conductivity between the crystalline rock and the non-cohesive granular deposits.

A number of hydrogeological consulting reports covering parts of this sector are available and easily accessible, since the towns in the region use groundwater as a source of drinking water supply. These reports constitute an important source of information regarding the hydraulic conductivity (obtained from pumping tests and permeability tests) as well as regarding the hydrofacies. These data are integrated as input information to construct the

model. In order to complete the information on the hydraulic properties of the aquifer, the grain-size curves of the samples collected from the surface and drill hole have been used to estimate the hydraulic conductivity using different empirical formulas (Hazen, 1911; Beyer, 1964; NAVFAC, 1974; Chapuis, 2004). Such collection of samples is important because it allows determining the hydraulic conductivity profiles considering the different layers identified during borehole logging.

After filtering groundwater static levels from the database (removing those that were measured in the bedrock), the remaining water table elevations are incorporated into the numerical model. These observation points (67 points) are used for the calibration of the groundwater flow model when comparing the observed actual water table levels with the simulated levels.

Table 1 Percentage of annual precipitation recharging the aquifer associated with the different surficial Quaternary units.

Soil group ¹	Sediment units ¹	Recharge (% of annual precipitation) ²
B	Littoral, deltaic and alluvial	27
C	Organic and eolian	14
D	Deep-water fine sediments and bedrock	7

¹ Based on the Soil Conservation Service classification

² From Evans(2007)

Concerning the recharge, every type of sediments mapped on the surficial geology map was classified into one of three soil groups (Table 1). Then, a percentage of annual precipitation recharging the aquifer was assigned to each soil group (Evans, 2007). By considering four regional climate stations (three from Environment Canada and one from Rio Tinto Alcan), the Thiessen polygons are built over the model to generate the spatial distribution of annual precipitation (Anctil et al., 2005). The recharge value assigned to each polygon is obtained by multiplying the percentage associated with the sediment type by the annual amount of precipitation on the polygon. This method is not without uncertainty since the values of recharge have not been measured but assessed based on the results of hydrogeological consulting reports. Also, considering that the purpose of this study is to compare the impact of the hydraulic conductivity distribution and simplification, the recharge does not need to be exact but need to be the same for each model.

The FEFLOW 6 modeling and simulating software (DHI-WASY, 2010) is used in this study mainly because of the assets offered by a finite-element numerical method compared with the finite-difference numerical method. With a finite-element method, irregular or curved aquifer's boundaries, anisotropic and heterogeneous aquifer's properties can be easily incorporated into the numerical model (Istok, 1989). Such particularities are typically observed in unconsolidated aquifers. The simulations were realized in a steady-flow regime, for saturated conditions and with the "free and movable surface mode" (DHI-WASY, 2009).

Results

Reconstruction of the hydrostratigraphy from the interpretation of the existing and collected data

The regional surficial map allowed a quick identification of the depositional environment and the overall stratigraphic successions. It indicated key areas where samples could be taken and sections measured. However, numerous stratigraphic units are too thin to be included as such in a 3D model except significant contacts (e.g. the contact between marine clay and the sands bodies above). The CPT drillings allowed identifying reflectors revealed on the georadar sections. This was very useful in the northern center of the aquifer where a thick horizon of peat lies over a sand unit. The contact between these units is clearly visible as a reflector on the georadar (Figure 3).

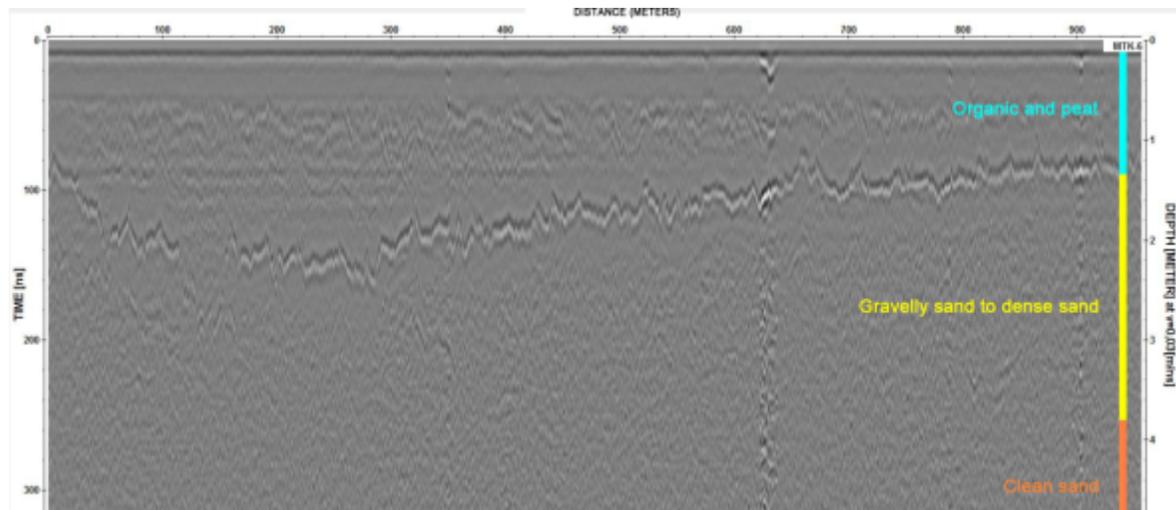


Figure 3 : Georadar section CC' with CPT-MTK-6 results (column on the right-hand of the figure).

The results of the CPT are interpreted with Robertson (2009).

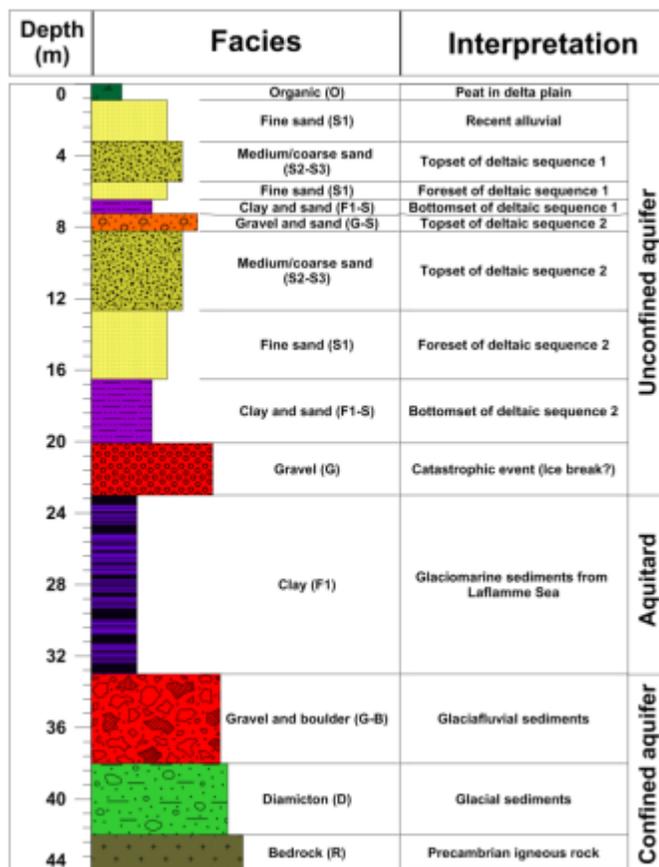


Figure 4 : Detailed stratigraphic column of the study area. The thickness of the units shown in the column represents an average thickness obtained from the borehole stratigraphy logging.

Following the compilation of existing and new data, a detailed stratigraphy of the study area is established (Figure 4). Ten layers and seven lithofacies are identified within the unconfined aquifer. Certain facies (S1, S2-S3 and F1-S) are stratigraphically repeated in the sections. The layout of facies distinguishes two construction phases of deltaic sediments (Deltaic unit 1 and 2). Each deltaic

unit follows reported typical vertical facies succession (Gilbert, 1885; Elliott, 1986; Bhattacharya, 2006). Even if layers 5 and 9 (F1-S) can be interpreted as aquitards, the sand units present in this facies allows significant groundwater flow. Only the first 10 layers are integrated in the model considering that they constitute the unconfined aquifer.

The 3D detailed model resulting from the described methodology is presented in Figure 5. The new data obtained and the interpolation method used, resulted in a satisfactory 3D structural model in agreement with current knowledge of the Quaternary geology of the

region. However, specific rectifications are made to smooth horizons in order to prevent numerical instabilities in the model.

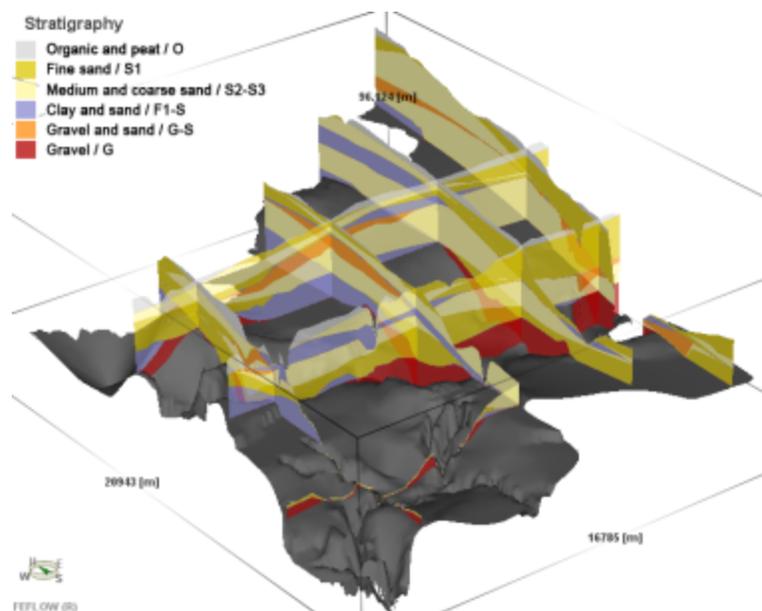


Figure 5 : View of the 3D model of the Mistouk unconfined aquifer. All the facies are deposited over the top of the clay layer (gray).

The hydraulic properties of the different identified facies have been compiled from collected samples (45 grain-size analyses) and the results of existing data extracted from 18 consulting hydrogeology reports available in the geodatabase (Chesnaux et al., 2011). In these reports, 84 grain-size analyses are available as well as results on

hydraulic testing (pumping tests). The grain-size distributions determined on samples collected for this study (45 samples). Most collected samples are classified as well to medium-sorted sands. This indicates that the processes and the source that produced most of the sediments in the region have been steady over a large period of time. The grain-size distribution analyses facilitated discriminating two groups of sediments showing similar distributions; a well-sorted fine sand and a medium-sorted medium/coarse sand. The hydraulic conductivities values calculated using the various estimation methods vary from 1×10^{-5} m/s for clay and sand to $9,4 \times 10^{-3}$ m/s for gravel. Those values were assumed to be

the horizontal hydraulic conductivity since there are fewer sedimentary structures in that direction. The geometric average horizontal hydraulic conductivity (K_x & K_y) of each facies is indicated in Table 2. The K_x/K_z ratio has been established to 10, which is within the range of 2 to 10 for alluvium (Todd and Mays, 2005; Chesnaux et al., 2011; Chesnaux et al., 2011).

Table 2 The principal components of the hydraulic conductivities of the different facies that are input in the numerical model. The second column gives the range of the K values obtained for each facies.

Facies	Range of K values (m/s)	K_x & K_y implemented (m/s)	K_z implemented (m/s)
O/Organic and peat ¹	-	$5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-7}$
S1/Fine sand	$1,1 \times 10^{-5} - 3,1 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-5}$
S2-S3/Medium and coarse sand	$1,4 \times 10^{-4} - 3,1 \times 10^{-3}$	$3,4 \times 10^{-4}$	$3,4 \times 10^{-5}$
F1-S/Clay and sand	$1,0 \times 10^{-5} - 9,7 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-5}$
G-S/Gravel and sand	$3,2 \times 10^{-4} - 9,1 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-5}$
G/Gravel	$1,8 \times 10^{-3} - 9,4 \times 10^{-3}$	$7,0 \times 10^{-3}$	$7,0 \times 10^{-4}$

¹Not measured in this study.

Boundary conditions

The developed model contains 25 439 triangular elements per layer, and 13 297 nodes per slice (Figure 6). The number of elements respect previous work on hydrological models (Refsgaard, 1997). A mesh refinement is applied around the edge of the aquifer, near the river and around the observation wells.

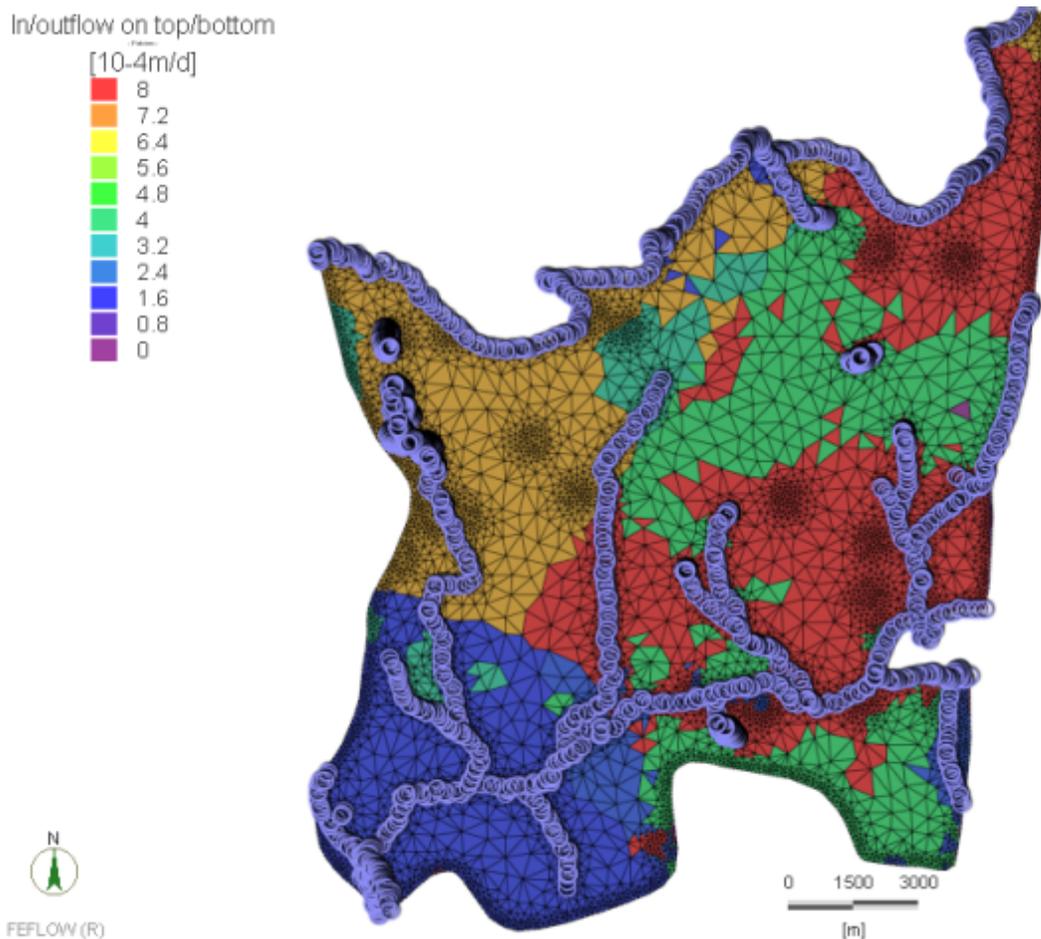


Figure 6 : Distribution of the recharge over the model and location of the applied Dirichlet boundary conditions (blue circles). The triangles represent the elements and nodes of the mesh. Note that the boundary conditions other than Dirichlet boundaries are no-flow boundaries.

Fixed-head boundary conditions (Dirichlet conditions) are assigned to the nodes located along: 1) the Peribonka River to the north at 172 m, 2) the south contact with Grande Decharge River at 102 m, 3) the Labrecque Lake to the east at 132 m and 4) rivers and lakes within the model at elevation extracted from the DEM (Figure 6). The rest of the boundaries of the model are no flow boundary since they correspond either to the groundwater divides, to the lateral contact with the outcropping bedrock outcrops, or to the top of the impermeable clay layer at the base of the aquifer.

The recharge of the Mistouk aquifer is set to vary from 29,4 to 294,0 mm/year. Based on data in Table 1, and considering the annual precipitation varying from 938 to 1089 mm/year over the region. Figure 6 shows the distribution of the recharge over the top of the model.

The different hydrostratigraphic models

In addition to the most detailed model (Model 1, a 10-layer model in Figure 8), when merging a number of adjacent units with the equivalent hydraulic conductivity concept (Figure 7), four hydrostratigraphical simplified models are created. By increasing order of simplification, these are: Model 2, a 5-layer model, Model 3, a 5-layer model based on similarities, Model 4, a 2-layer model, and Model 5, a single-layer model. Note that for Model 3, the layers were grouped considering the hydraulic and sedimentologic similarities. The equivalent hydraulic conductivity values are applied on the nodes located on each slice with the same X-Y position. The four different simplified models use the same mesh and the same boundary conditions as the detailed model, but the hydraulic

Model 1		Model 2		Model 3		Model 4		Model 5	
Organic	K_1	Layer 1	$K1_{eq}$	Layer 1	K_1	Layer 1	$K1_{eq}$	Layer 1	$K1_{eq}$
Fine sand	K_2			Layer 2	$K2_{eq}$				
Medium/coarse sand	K_3	Layer 3	$K3_{eq}$						
Fine sand	K_4			Layer 4	$K4_{eq}$				
Clay and sand	K_5	Layer 1	$K1_{eq}$			Layer 1	$K1_{eq}$		
Gravel and sand	K_6			Layer 2	$K2_{eq}$				
Medium/coarse sand	K_7	Layer 3	$K3_{eq}$			Layer 3	$K3_{eq}$		
Fine sand	K_8			Layer 4	$K4_{eq}$				

Figure 7 : Hydrostratigraphic scenarios of the 5 models that have been simulated and compared for the Mistouk aquifer.

conductivity for each layer varies according to the equivalent hydraulic conductivity values presented in Figure 7.

Comparison of the numerical results of the five different models

The simulated water table elevations are compared to the water levels observed in the 67 wells used for calibration distributed over the Mistouk aquifer (Table 3) for the steady-state regional flow conditions, by calculating the Root Mean Square (RMS) as follows (Equation 3):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \quad \text{Eq.3}$$

where x is the difference between the simulated and measured groundwater levels and n is the number of observed values. The different models were also compared with the flux at the Dirichlet boundary conditions required for the simulation to converge.

Table 3 Comparison of the results of the five numerical models.

Model	Description	RMS (m)	Difference (%)	Flux at Dirichlet boundaries (m³/s)
1	Detailed with 10 layers	3,78	0	88,2
2	5 layers	4,81	27,0	41,5
3	5 layers	4,83	27,7	94,7
4	2 layers	4,45	17,7	13,5
5	1 layer	4,01	6,1	34,8

After calibration, or the detailed model, Model 1, a RMS of 3,78 m is obtained while with the simplified models the RMS ranges from 4,01 to 4,83 m (Table 3). These RMS values do not vary significantly from the detailed model to the simplified models. The results illustrate that there is still a gain in accuracy with the most detailed models, but this gain is relatively small. Another observation is that the relation is not linear; as the increase in accuracy is not proportional to an increase in the number of layers. Of the 4 simplified models, the single layer model has the lowest RMS, therefore the greatest accuracy for simulating the regional groundwater flow.

The variable showing the greatest disparity between the models is the flux needed at Dirichlet boundaries for the simulation to converge. The five-layer models (Models 2 and 3) have almost the same RMS (4,81 m and 4,83 m) but they have a large difference regarding that flux. Since the recharge is identical and the water table is similar for every

model, the volume in the Mistouk aquifer is equivalent for each model. The variation in the flux is therefore related to the water transfer between the aquifer and the rivers or the lake. In Model 4, the exchange is minimal while for Model 3 it is the highest of the 5 models. Three parameters (hydraulic conductivities, boundary conditions and recharge) were tested by performing sensitivity analyses with Model 1. These analyses were carried out by increasing or decreasing one parameter at a time by trial-and-error method. The implemented values varied in one order of magnitude for the hydraulic conductivities, within 10 meters for the boundary conditions and up to twice for the recharge. The results show that the fixed-head boundary conditions and the hydraulic conductivity are the variables that have the greatest effect on the results. Aquifer recharge has a negligible influence over the model.

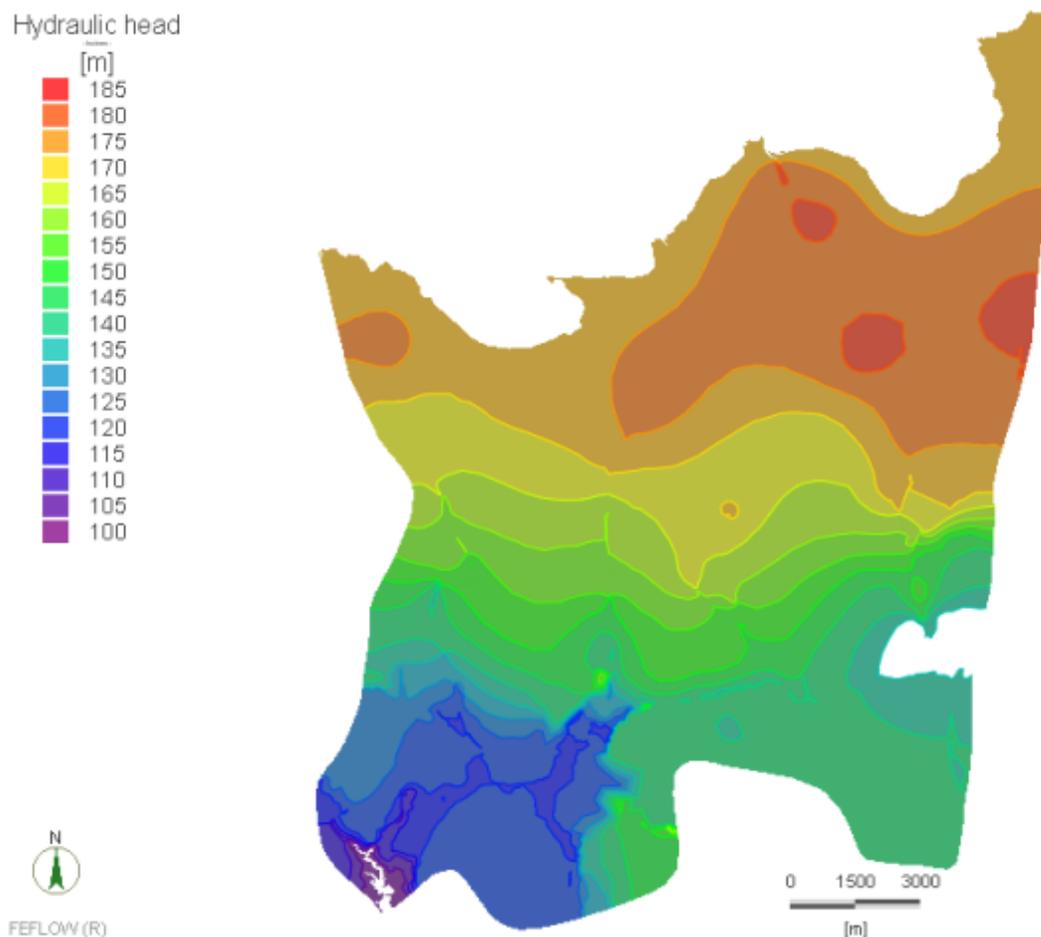


Figure 8 : Simulated equipotential lines of the hydraulic heads in the Mistouk aquifer (Model 1).

Regional groundwater flow

Figure 8 presents an example of the groundwater flow map resulting for the single layer model. The groundwater is generally flowing from north to south with local exceptions. However, in most of the northern part of the aquifer, groundwater discharges rather into the northbound Péribonka River. The hydraulic relationship between groundwater and rivers is variable throughout the model. In the western part of the model, the rivers are replenished by the aquifer whereas the rivers recharge the aquifer in the eastern part of the aquifer.

The global water budget (Table 4) for the detailed model shows a total regional flow of 79,7 m³/s for the study area. Most of the groundwater/surface water exchanges occur in the intermediate streams (88,1% of total flow).

Table 4 Simulated groundwater budget (Model 1).

	Input	Output	Input	Output
	(m³/s)	(m³/s)	(%)	(%)
Péribonka River	0,1	1,0	0,1	1,3
Lake Labrecque	5,8	8,6	7,3	10,8
Grande Décharge	2,3	2,3	2,9	2,9
Intermediate streams	70,2	67,8	88,1	85,1
Recharge	1,3	-	1,6	-
Total regional flow	79,7	79,7	100	100

Discussion and conclusion

The main purpose of the study was to assess the impacts of simplifying hydrostratigraphic units on the accuracy of the results of a 3D numerical groundwater flow model of a granular aquifer. This approach has been tested on simulating groundwater flow for the Mistouk aquifer located in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region (Quebec, Canada). As expected, this example has shown that simplifying the hydrostratigraphy decreases the accuracy of the results obtained from the different models. However, this loss of accuracy is limited in regards of the increase of the degree of simplification. This observation shows

that the modeller can simplify a model without significant loss of accuracy of the simulation results.

Such results demonstrate first that the simplified models based on the calculations of equivalent conductivities are effective and it is consequently appropriate to consider these simplifications when modeling groundwater flow. Secondly, the study shows that the boundary conditions of the models are the key parameters controlling the calibration and the accuracy of the models in relation with the hydraulic conductivity distribution within the aquifer.

The results of this study have implications on the choices that modellers can consider in regards of the quantity of field data available to construct their hydrostructural 3D models. Most of the numerical models developed for example in the industry are limited by costs consideration since acquiring field data in hydrogeology is expensive and time consuming. One of the most difficult decisions to be taken by modellers consists of determining a satisfying balance between the quantity of data that they need (the cost) to construct their model and their expectations regarding the accuracy of the models (the results of their study). This study illustrates that compromises can be set, considering the proposed methodology of simplification without losing much on the accuracy of the results (calibration) of the numerical models dominated by Dirichlet boundary conditions.

Acknowledgements

This project was funded by the hydrogeological project conducted in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region as part of the « Programme d'Acquisition de Connaissances sur les Eaux Souterraines » of Quebec (PACES-SLSJ), with contributions from the « Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs » of the Government of Québec, Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), Ville de Saguenay, Conseil des Montagnais, Conférence régionale des élus and the four Municipalités Régionales de Comté of the region. Funding from the “Fondation de l'UQAC” (FUQAC) is also acknowledged. The authors would like to thank Cynthia Vigneault, Emmanuelle B.Gagné and Pierre-Luc Dallaire for their support in field data acquisition. One anonymous reviewer and the Editor-in-Chief, Dr. LaMoreaux are also thanked for their comments which improved the quality of the manuscript.

CHAPITRE 4 : CONCLUSION

Le projet a pour but de répondre à deux objectifs : le premier objectif est de développer de nouvelles classifications de lithofaciès et d'hydrofaciès tandis que le deuxième objectif est d'analyser les effets de simplifications hydrostratigraphiques sur la précision des modèles numériques 3D de l'écoulement souterrain.

Dans les études traitant de l'écoulement souterrain dans les dépôts meubles, les classifications de lithofaciès et d'hydrofaciès sont largement répandues, mais elles sont aussi utilisées de manières très différentes. Après la taille des grains, l'une des variables importantes dans la capacité d'un sol à laisser circuler l'eau souterraine est certainement le tri. C'est pourquoi il est suggéré d'ajouter un indice aux classifications de lithofaciès, principalement au sable, étant donné l'étalement granulométrique, la prépondérance du sable dans les sols et les écarts qu'il peut y avoir sur la conductivité hydraulique des sols. Certes il existe un certain degré de cohérence dans la nomenclature des lithofaciès, mais presque qu'aucune pour les hydrofaciès. Pour clarifier le rôle de l'hydrofaciès, l'ajout d'un membre en lien avec la conductivité hydraulique de l'hydrofaciès est proposé.

La modélisation numérique de l'écoulement permet de produire des résultats fiables avec peu de données. L'approche de simplification basée sur la conductivité hydraulique a été testée à l'aide d'une simulation de l'écoulement des eaux souterraines de l'aquifère

Mistouk situé dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Québec, Canada). Cet exemple a montré que la simplification de l'hydrostratigraphie diminue peu la justesse des résultats obtenus à partir des différents modèles. Ces résultats montrent d'abord que les modèles simplifiés basés sur les calculs de conductivités hydrauliques équivalents sont efficaces et il est par conséquent approprié de considérer ces simplifications pour simuler l'écoulement des eaux souterraines. Deuxièmement, l'étude montre que les conditions aux limites des modèles sont les facteurs clés contrôlant le calage et la justesse des modèles en relation avec la distribution de la conductivité hydraulique dans l'aquifère. Cette étude montre que des compromis de simplification pour le modélisateur peuvent être définis, compte tenu de la méthodologie proposée de simplification sans perdre beaucoup sur l'exactitude des résultats (calage) des modèles numériques.

En combinant les résultats répondant aux deux objectifs de l'étude, on remarque que les résultats du deuxième objectif (simplification en modélisation) viennent diminuer l'importance d'une uniformité des classifications des unités hydrostratigraphique. À partir de données provenant de sources différentes avec des méthodologies distinctes, il est possible de créer des modèles d'écoulement numérique justes et fiables. Par contre, le fait d'utiliser plusieurs classifications, notamment granulométriques, jette un éclairage sur les incertitudes des résultats obtenus.

Les conclusions de notre étude découlent d'une analyse régionale à grande échelle et il serait à l'avenir pertinent de tester l'approche de simplifications hydrostratigraphiques

sur des problèmes plus locaux (par exemple à l'échelle d'un essai de pompage), mais aussi sur le transport de contaminants avec des simplifications à effectuer sur les propriétés dispersives des milieux.

RÉFÉRENCES

- Aigner, T., H. Heinz, J. Hornung and U. Asprion (1998). "A hierarchical process-approach to reservoir heterogeneity: examples from outcrop analogues." Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production 22(1): 1-12.
- Albinet, M. and J. Margat (1970). "Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines." Bull. BRGM 2(4): 13-22.
- Allen, D., N. Schuurman, A. Deshpande and J. Scibek (2008). "Data integration and standardization in cross-border hydrogeological studies: a novel approach to hydrostratigraphic model development." Environmental geology 53(7): 1441-1453.
- Ancil, F., J. Rousselle and N. Lauzon (2005). Hydrologie: cheminements de l'eau., Presses inter Polytechnique.
- Anderson, M. (1989). "Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments." Bulletin of the Geological Society of America 101(4): 501-511.
- Anderson, M. P., J. S. Aiken, E. K. Webb and D. M. Mickelson (1999). "Sedimentology and hydrogeology of two braided stream deposits." Sedimentary Geology 129(3-4): 187-199.
- Asprion, U. (1997). "Aquifer architecture analysis using ground- penetrating radar: Triassic and Quaternary examples (S Germany)." Environmental Geology 31(1-2): 66-75.
- ASTM (2011). "2487-00 Standard classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)." Annual Book of ASTM Standards, Section 4.
- Bayer, P., P. Huggenberger, P. Renard and A. Comunian (2011). "Three-dimensional high resolution fluvio-glacial aquifer analog: Part 1: Field study." Journal of Hydrology 405(1-2): 1-9.
- Bersezio, R., A. Bini and M. Giudici (1999). "Effects of sedimentary heterogeneity on groundwater flow in a Quaternary pro-glacial delta environment: joining facies analysis and numerical modelling." Sedimentary Geology 129(3-4): 327-344.
- Beyer, W. (1964). "On the determination of hydraulic conductivity of gravels and sands from grain-size distributions." Wasserwirtschaft-Wassertechnik 14: 165-169.
- Bhattacharya, J. (2006). Deltas. Facies Models Revisited, SEPM (Society for Sedimentary Geology). SEPM Special Publication No.84: 237-292.
- Calvache, M. L., S. Ibáñez, C. Duque, W. Martín-Rosales, M. López-Chicano, J. C. Rubio, A. González and C. Viseras (2009). "Numerical modelling of the potential effects of a dam on a coastal aquifer in S. Spain." Hydrological Processes 23(9): 1268-1281.

- Chapuis, R. P. (2004). "Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio." Canadian Geotechnical Journal 41(5): 787-795.
- Chapuis, R. P., Q. M. d. l'environnement and Q. S. d. p. e. d. e. souterraines (1999). Guide des essais de pompage et leurs interprétations, [Québec]: Québec, Ministère de l'environnement.
- Chesnaux, R., C. Baudement and M. Hay (2011). Assessing and comparing the hydraulic properties of granular aquifers on three different scales. Proceedings of Geohydro 2011.
- Chesnaux, R., C. Baudement and M. Hay (2011). Assessing and comparing the hydraulic properties of granular aquifers on three different scales. GeoHydro 2011, Quebec City.
- Chesnaux, R., M. Lambert, J. Walter, U. Fillastre, M. Hay, A. Rouleau, R. Daigneault, A. Moisan and D. Germaneau (2011). "Building a geodatabase for mapping hydrogeological features and 3D modeling of groundwater systems: Application to the Saguenay-Lac-St.-Jean region, Canada." Computers and Geosciences 37: 1870-1882.
- Collinso, J. (1969). "Sedimentology of Grindslow Shales and Kinderscout Grit - a Deltaic Complex in Namurian of Northern England." Journal of Sedimentary Petrology 39(1): 194-&.
- Daigneault, R.-A., P. A. Cousineau, É. Leduc, G. Beaudoin, S. Milette, N. Horth, D. W. Roy, M. Lamothe and G. Allard (submitted in 2011). Rapport final sur les travaux de cartographie des formations superficielles réalisés dans le territoire municipalisé du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Québec) entre 2009 et 2011. Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.
- Dessureault, R. (1975). Hydrogéologie du Lac St-Jean (partie nord-est). Québec, Ministère des richesses naturelles: 90p.
- DHI-WASY (2009). White Papers Vol. I. Berlin, Germany: 368.
- DHI-WASY (2010). FEFLOW 6 - User Manual. Berlin, Germany: 94.
- Doherty, J. (2011). "Modeling: picture perfect or abstract art?" Groundwater 49(4): 455-455.
- Drew, D. and H. Hötzl (1999). Karst hydrogeology and human activities : impacts, consequences and implications. Rotterdam, Netherlands ; Brookfield, Vt., A.A.Balkema.
- Elliott, T. (1986). Deltas. Sedimentary Environments and Facies. H. G. Reading. Oxford, U.K., Blackwell Scientific Publications: 113-154.
- Evans, A. W. (2007). "Planning and urban design standards." Journal of the American Planning Association 73(3): 355-356.
- Eyles, N., C. Eyles and A. Miall (1983). "Lithofacies types and vertical profile models; an alternative approach to the description and environmental interpretation of glacial diamict and diamictite sequences." Sedimentology 30(3): 393-410.
- Ezzy, T. R., M. E. Cox, A. J. O'Rourke and G. J. Huftile (2006). "Groundwater flow modelling within a coastal alluvial plain setting using a high-resolution hydrofacies approach; Bells Creek plain, Australia." Hydrogeology Journal 14(5): 675-688.

- Gadd, N. R. (1988). "The basin, the ice, the Champlain Sea." The late Quaternary development of the Champlain Sea basin. GAC Special Paper 35: 15-24.
- Gilbert, G. K. (1885). The topographic features of lake shores, U.S Geological Survey. 5th Annual Report (1883-1884): 69-123.
- Gogu, R. and A. Dassargues (2000). "Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods." Environmental geology 39(6): 549-559.
- Hazen, A. (1911). "Discussion: Dams on sand foundations." Transactions, American Society of Civil Engineers 73: 199.
- Heinz, J. and T. Aigner (2003). "Hierarchical dynamic stratigraphy in various Quaternary gravel deposits, Rhine glacier area (SW Germany): implications for hydrostratigraphy." International Journal of Earth Sciences 92(6): 923-938.
- Hill, M. C. (2006). "The practical use of simplicity in developing ground water models." Ground Water 44(6): 775-781.
- Hill, M. C. (2006). "The Practical Use of Simplicity in Developing Ground Water Models." Ground water 44(6 Understanding): 775-781.
- Hudon-Gagnon, E., R. Chesnaux, P. A. Cousineau and A. Rouleau (2011). "A methodology to adequately simplify aquifer models of quaternary deposits: preliminary results." GeoHydro 2011.
- Istok, J. (1989). Groundwater Modeling by the Finite Element Method. Washington D.C., American Geophysical Union.
- Klingbeil, R. and et al. (1999). "Relating lithofacies to hydrofacies: Outcrop-based hydrogeological characterisation of Quaternary gravel deposits." Sedimentary Geology 129: 299-310.
- Klingbeil, R., S. Kleinedam, U. Asprion, T. Aigner and G. Teutsch (1999). "Relating lithofacies to hydrofacies: outcrop-based hydrogeological characterisation of Quaternary gravel deposits." Sedimentary Geology 129(3-4): 299-310.
- Kostic, B., A. Becht and T. Aigner (2005). "3-D sedimentary architecture of a Quaternary gravel delta (SW-Germany): Implications for hydrostratigraphy." Sedimentary Geology 181(3-4): 147-171.
- LaSalle, P. and G. Tremblay (1978). Dépôts meubles Saguenay Lac Saint-Jean. Québec, Ministère des richesses naturelles.
- Leonards, G. (1962). "Engineering properties of soils." Foundation engineering: 66-240.
- Macfarlane, P. (2009). "New insights into the hydrostratigraphy of the High Plains aquifer from three-dimensional visualizations based on well records." Geosphere 5(1): 51.
- Matheron, G. (1969). Le krigeage universel, École nationale supérieure des mines de Paris.
- Maxey, G. B. (1964). "Hydrostratigraphic units." Journal of Hydrology 2: 124-129.
- Miall, A. D. (1977). Review of braided river depositional environment, Earth Sci. Rev. 13: 1-62.
- Miall, A. D., N. Tyler and SEPM (Society for Sedimentary Geology). Meeting (1991). The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery. Tulsa, Okla., SEPM (Society for Sedimentary Geology).
- NAVFAC, N. F. E. C. (1974). Design manual: civil engineering, Navy Dept.

- Ouellon, T., R. Lefebvre, D. Marcotte, A. Boutin, V. Blais and M. Parent (2008). "Hydraulic conductivity heterogeneity of a local deltaic aquifer system from the kriged 3D distribution of hydrofacies from borehole logs, Valcartier, Canada." Journal of Hydrology 351(1-2): 71-86.
- Parent, M., S. J. Paradis and R. Boivin (2009). Legende generale Formations superficielles, CGQ-Québec.
- Posamentier, H. W. (1988). "Eustatic controls on clastic deposition sequence and systems tract models."
- Refsgaard, J. C. (1997). "Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models." Journal of Hydrology 198(1-4): 69-97.
- Ross, M., M. Parent and R. Lefebvre (2004). "3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada." Hydrogeology Journal 13(5-6): 690-707.
- Savard, M., R. Lefebvre, R. Martel, M. Ouellet and N. Rousseau (2007). Guide méthodologique pour la caractérisation des aquifères granulaires de surface. Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
- Schoeneberger, P. J. (2002). Field book for describing and sampling soils, Version 3.0, Government Printing Office.
- Schwartz, F. W. and H. Zhang (2003). Fundamentals of ground water, New York Wiley.
- Seaber, P. (1988). "Hydrostratigraphic units." Geological Society of America, Bolder9-14.
- Sepúlveda, N. and E. L. Kuniandy (2009). "Effects of model layer simplification using composite hydraulic properties." Hydrogeology Journal 18(2): 405-416.
- Sharpe, D. R., A. Pugin, S. E. Pullan and G. Gorrell (2003). "Application of seismic stratigraphy and sedimentology to regional hydrogeological investigations: an example from Oak Ridges Moraine, southern Ontario, Canada." Canadian Geotechnical Journal 40(4): 711-730.
- Todd, D. K. and L. W. Mays (2005). Groundwater hydrology. New York ; Toronto, J. Wiley.
- Walker, R. G. and N. P. James (1992). Facies models : response to sea level change. St. John's, T.-N., Geological Association of Canada.
- Weissmann, G., S. Carle and G. Fogg (1999). "Three-dimensional hydrofacies modeling based on soil surveys and transition probability geostatistics." Water Resources Research 35(6): 1761-1770.

ANNEXE 1

GLOSSAIRE

Termes	Définition	Référence citée en lien avec la définition retenue
Aquiclude	<i>Unité géologique totalement ou partiellement saturée en eau, dans laquelle l'eau ne circule pas du tout.</i>	(Chapuis et al., 1999)
Aquifère	<i>Unité géologique totalement ou partiellement saturée en eau d'où l'on peut extraire de l'eau par pompage de façon économique.</i>	(Chapuis et al., 1999)
Aquitard	<i>Unité géologique totalement ou partiellement saturée en eau, d'où on ne peut pas extraire d'eau par pompage de façon économique, mais qui est assez perméable pour laisser percoler des quantités d'eau appréciables quand on se place à l'échelle du kilomètre carré ou plus.</i>	(Chapuis et al., 1999)
Conductivité hydraulique	<i>La conductivité hydraulique est introduite dans la loi de Darcy comme une constante de proportionnalité reliant la décharge spécifique et le gradient hydraulique.</i>	(Schwartz and Zhang, 2003)
Élément architectural	<i>Subdivision morphologique d'un système de dépôts particulier caractérisé par un assemblage distinct de faciès, géométrie de faciès et de processus de dépôts.</i>	(Walker and James, 1992)
Faciès	<i>Ensemble de roche ou de sédiments caractérisé par une combinaison particulière de lithologie ; structures physiques et biologiques qui donne un aspect différent des roches ou sédiments dessus, dessous ou latéralement adjacent.</i>	(Walker and James, 1992)
Hydrofaciès	<i>Unité sédimentologique homogène ou une unité hydrogéologique homogène, mais pas nécessairement isotrope (Anderson, 1989), formée dans des conditions caractéristiques et qui peut ainsi posséder des propriétés hydrauliques caractéristiques.</i>	Anderson (1989)

Perméabilité	La perméabilité du roc ou du sol défini sa capacité à transmettre un fluide.	(Todd and Mays, 2005)
Unité hydrostratigraphique	<i>Ensemble de roches ou sédiments avec une extension latérale considérable qui compose un cadre géologique pour un système hydrologique raisonnablement distinct</i>	Maxey (1964)
	<i>Masse de roches ou sédiments distincts et caractérisés par une porosité et une perméabilité. Les unités hydrostratigraphiques sont définies par le nombre, la taille, la forme, par l'arrangement et l'interconnexion des interstices et sont reconnues sur la base de la nature, l'extension et la magnitude des interstices dans n'importe quelle masse de roche sédimentaire, métamorphique ou ignée</i>	Seaber (1988)

ANNEXE 2

DONNÉES PIÉZOCONES

