



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

**COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA  
DOSSIER PUBLIC 7734**

**Modèle hydrogéologique 3D du bassin  
versant de la rivière Chaudière**

**N. Benoit, J.W. Molson, M.Y. Brun Koné, M. Nastev**

**2015**

**Canada** 



## COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA DOSSIER PUBLIC 7734

# Modèle hydrogéologique 3D du bassin versant de la rivière Chaudière

**N. Benoit<sup>1</sup>, J.W. Molson<sup>2</sup>, M.Y. Brun Koné<sup>2</sup>, M. Nastev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Commission géologique du Canada, Québec, Québec

<sup>2</sup>Université Laval, Département de géologie et de génie géologique, Québec, Québec

**2015**

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2015

doi:10.4095/295674

On peut télécharger cette publication gratuitement à partir de GEOSCAN (<http://geoscan.rncan.gc.ca/>).

### **Notation bibliographique conseillée**

Benoit, N., Molson, J.W., Brun Koné, M.Y. et Nastev, M., 2015. Modèle hydrogéologique 3D du bassin versant de la rivière Chaudière; Commission géologique du Canada, Dossier public 7734, 32 p. doi:10.4095/295674

Les publications de cette série ne sont pas révisées; elles sont publiées telles que soumises par l'auteur.

## Table des matières

1. Introduction .....	1
2. Description du modèle numérique d'écoulement.....	2
2.1 Conditions frontières .....	4
2.2 Conductivité hydraulique .....	4
2.3 Modélisation numérique .....	8
3. Procédure d'utilisation du modèle .....	15
3.1 Données d'entrée et le fichier de contrôle watflow.con .....	15
3.2 WATFLOW.....	17
3.3 Résultats .....	17
4. Limite et droit d'utilisation .....	21
5. Références .....	21

## Liste des figures

Figure 1. Maillage du modèle numérique du bassin versant de la rivière Chaudière (vue en plan).....	3
Figure 2. Paramètres du modèle numérique montrant : a) la recharge distribuée, et b) l'utilisation et la consommation de l'eau souterraine.....	5
Figure 3. Géologie et conductivité hydraulique ( $K$ ) du modèle : a) Carte tectonostratigraphique simplifiée et valeurs de la conductivité hydraulique exprimée en logarithme selon b) les unités tectonostratigraphiques, et c) la profondeur (trait rouge correspond à la moyenne mobile de $\log K$ sur 5 m).....	6
Figure 4. Distribution de la conductivité hydraulique ( $K$ ) pour les dépôts meubles et le roc à travers une coupe verticale (localisation $y = 5.113 \times 10^6$ m). .....	7
Figure 5. Simulation numérique calée : a) piézométrie observée et b) charges simulées (vue en plan).....	10
Figure 6. Graphique binaire des charges observées vs charges simulées. ....	11
Figure 7. Distribution 3D des charges hydrauliques simulées. ....	11
Figure 8. Localisation des coupes verticales pour les charges hydrauliques de la figure 9. Les charges dans les coupes 'Arb1' et 'Arb2' sont montrées dans Brun Koné (2013). ....	12
Figure 9. Charges hydrauliques simulées dans les coupes verticales transversales (montrées à la figure 8). a) isocontours des charges (exagération verticale $\approx 40x$ ) ; b) les profils verticaux des charges aux points identifiés sur le coupes (les échelles sont identiques	

(20m×310m) sauf pour les charges du profile (h) (40m×310m)). Les profiles centraux (9 b,e,h) sont localisés en dessous de la rivière Chaudière. ....	12
Figure 10. Lignes d'écoulement 3D ('streamlines') simulées à partir de points sélectionnés avec le modèle (vue en plan).....	13
Figure 11. Lignes d'écoulement 3D ('streamlines') simulées avec le modèle (vue 3D en perspective). Pour cette figure, les points d'origines des lignes d'écoulement sont les mêmes que ceux de la figure 10.....	14
Figure 12. Procédure de modélisation avec le logiciel WATFLOW. L'exemple ci-haut assume que l'utilisateur a demandé les fichiers de sorties en 2D (ex., <i>copy tecsc1.2dm + tec.hds</i> ). Pour les fichiers de sortie en 3D (si <i>ioutp=6</i> ), on ferait, par exemple : ( <i>copy tecsc1.3dm + tec.hds</i> ). ....	20

## Liste des tableaux

Tableau 1. Fichiers d'entrée du modèle WATFLOW pour le modèle de la Chaudière. ....	16
Tableau 2. Fichiers de sortie du modèle WATFLOW pour le modèle de la Chaudière. ....	19

## Annexe

Fichier de contrôle watflow.con

# 1. Introduction

Dans le cadre du projet de cartographie hydrogéologique du bassin versant de la rivière Chaudière, lequel fait parti du Programme géoscientifique des eaux souterraines de la Commission géologique du Canada (CGC, 2013), une collaboration étroite a été établie avec l'Université Laval pour développer un modèle numérique d'écoulement de l'eau souterraine du bassin en trois dimensions (3D).

Une meilleure connaissance du système hydrogéologique du bassin versant de la Chaudière est importante pour différents facteurs dont la croissance de la population, l'usage intensif des eaux souterraines pour des fins agricoles, municipales et industrielles, et le potentiel des ressources en gaz de schiste au nord du bassin. Pour assurer un approvisionnement durable en eau souterraine, et pour assurer sa protection, il faut d'abord une caractérisation physique et chimique des aquifères et aquitards, une connaissance du bilan de masse (taux de recharge et résurgence), et une connaissance des systèmes d'écoulement. C'est dans ce contexte, et avec les données déjà disponibles sur la caractérisation physique du système que le développement d'un modèle numérique d'écoulement régional s'avère utile.

Brun Koné (2013) a fait le développement du modèle numérique du bassin de la rivière Chaudière lors de son projet de recherche (M.Sc.A.) sous la supervision de J. Molson (Université Laval) et de N. Benoit (CGC) et M. Nastev (CGC). Ce dossier public a pour objectif de diffuser le modèle développé. Bien que ce rapport soit basé surtout sur le modèle de Brun Koné, certains changements (ex. maillage, critères de calibration) ont été apportés par rapport à la version originale dont les données et les résultats les plus récents sont présentés ici. Le rapport est accompagné d'une courte description du modèle et d'une procédure d'utilisation. Pour d'autres aspects du développement du modèle, le lecteur doit se référer aux travaux de Brun Koné (2013).

## 2. Description du modèle numérique d'écoulement

Le logiciel de modélisation par éléments finis WATFLOW (Molson et al., 2002) a été utilisé pour simuler l'écoulement en régime permanent de l'eau souterraine du bassin versant de la rivière Chaudière, appelé *le modèle*.

La surface du modèle en trois dimensions (3D) correspond au modèle numérique d'élévation (MNE), fourni par la Direction du Patrimoine écologique et des Parcs (DPEP) du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP). Le MNE a été adapté pour assurer la cohérence avec le réseau hydrographique structuré aussi fourni par la MDDEFP. La base du modèle correspond à une profondeur de 300 m par rapport à la surface. Cette profondeur est considérée bien en dessous de la zone de fracturation importante, c'est-à-dire où l'eau souterraine y serait presque immobile. L'approche de Beckers and Frind (2001), déjà intégrée dans le modèle WATFLOW, a été utilisée pour représenter la zone non-saturée à l'échelle du bassin. Cette approche considère l'impact de l'hétérogénéité de la zone vadose sur la distribution de la recharge. La perméabilité relative du sol est déterminée à partir de la pression du fluide et des relations prédéfinis de Van Genuchten/Mualem.

Le modèle totalise 29 couches d'éléments finis dont 10 représentent le substratum rocheux, 18 constituent l'ensemble des dépôts meubles, et une autre représentant la couche de surface utilisée pour distribuer la recharge ("recharge spreading layer"). Le maillage du modèle est formé de 119 447 éléments triangulaires bidimensionnels (2D) sur le plan horizontal donc un total de 3 463 963 éléments triangulaires prismatiques 3D totalisant 1 815 720 nœuds.

Le maillage a été défini d'abord en 2D par des éléments triangulaires (Figure 1) générés par le logiciel TRIANGLE (Shewchuk, 1996) suivant ainsi les limites du bassin et du réseau hydrique. Le maillage a été raffiné aux rivières et aux points de pompages municipaux. Le maillage 3D en éléments triangulaires prismatiques a été bâti par la suite à partir des élévations de 10 couches hydrostratigraphiques interpolées (incluant la surface MNE et la base du modèle).

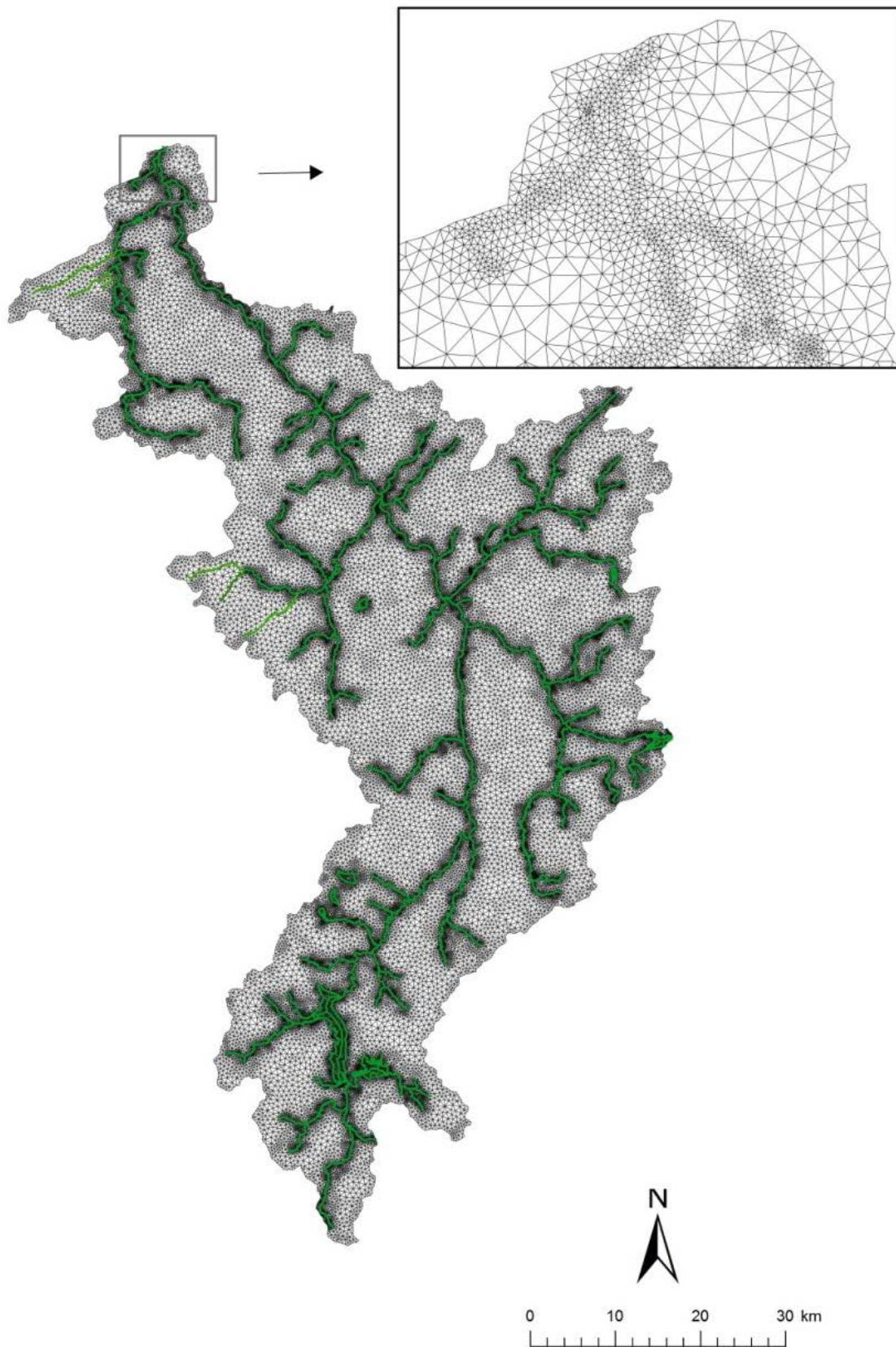


Figure 1. Maillage du modèle numérique du bassin versant de la rivière Chaudière (vue en plan).

## **2.1 Conditions frontières**

Les conditions d'écoulement aux limites du modèle sont représentées par la ligne de partage des eaux du bassin versant qui se traduit dans le modèle par une limite de flux nul. Des valeurs de charges constantes correspondantes aux élévations du MNE ont été imposées à la rivière Chaudière et ses tributaires principaux, soit ceux d'ordre 1, 2 et 3 selon la définition donnée par Strahler (1957). Une condition de flux nul a été imposée à la limite inférieure du modèle, lequel à une épaisseur uniforme de 300 m à partir de la surface du MNE.

À la surface du modèle, un taux de recharge a été imposé (Figure 2a) selon les estimations obtenues par Benoît et al. (2012) avec le modèle d'infiltration HELP (Schroeder et al., 1994) à une résolution spatiale de 250 m. Les puits municipaux importants dont l'information était disponible (68 puits) ont été intégrés au modèle comme un pompage ponctuel aux nœuds correspondants à la profondeur du puits en question, tandis que la consommation des puits privés et agricoles a été converti en lame d'eau équivalent et enlevée directement de la recharge (Figure 2b).

## **2.2 Conductivité hydraulique**

La conductivité hydraulique horizontale ainsi que l'anisotropie verticale constituent les paramètres de calage du modèle. La figure 3 présente les résultats d'analyse de la conductivité hydraulique estimée selon la méthode de Bradbury et Rothschild (1985) à partir de la capacité spécifique des données tirée du système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDEFP (<http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm>).

Sept unités hydrostratigraphiques ont été identifiées dans les dépôts meubles. Les conductivités hydrauliques de chaque unité ont été calées avec des charges hydrauliques et voici les valeurs ( $K_x/K_z$  m/s) : sol organique ( $10^{-5}/10^{-5}$ ), sable ( $10^{-6}/10^{-6}$ ), argile ( $10^{-9}/10^{-9}$ ), gr1 - gravier ( $10^{-3}/10^{-3}$ ), tillp - till perméable ( $10^{-6}/10^{-6}$ ), till ( $7 \times 10^{-7}/5 \times 10^{-7}$ ), et roc1 ( $10^{-7}/10^{-7}$ ). Notons que la couche de roc (roc1) à la base des dépôts meubles (interface) représente le roc très fracturée et est considérée pour fins de ce modèle comme une unité des dépôts meubles. Tel que discuté précédemment, ces unités meubles sont représentées par 18 couches d'éléments. Notons que les couches du modèle ne correspondent pas nécessairement exactement aux différentes unités hydrostratigraphiques et que chaque couche d'éléments du modèle peut



contenir différentes unités hydrostratigraphiques. Lorsque les unités hydrostratigraphiques sont définies, les couches d'éléments suivent ces unités autant que possible.

Les valeurs de conductivité hydraulique estimées varient généralement de l'ordre de  $10^{-7}$  à  $10^{-5}$  m/s pour les 100 premiers mètres du substratum rocheux (Figure 3c). Les valeurs de conductivité hydraulique jusqu'à la base du modèle (300 m) ont été définies par extrapolation linéaire, et diminuent à  $10^{-10}$  m/s à la limite inférieure. Pour les unités au roc, l'anisotropie  $K_z/K_x$  est assumée de l'ordre de 1/10, tandis qu'elle est fixée à 1 pour les dépôts sauf pour le till avec  $K_x/K_z = 7 \times 10^{-7} / 5 \times 10^{-7}$  m/s. La distribution des valeurs se trouve dans le fichier watflow.con en annexe. La figure 4 présente un exemple de la distribution de la conductivité hydraulique dans le modèle dans les dépôts meubles et le roc.

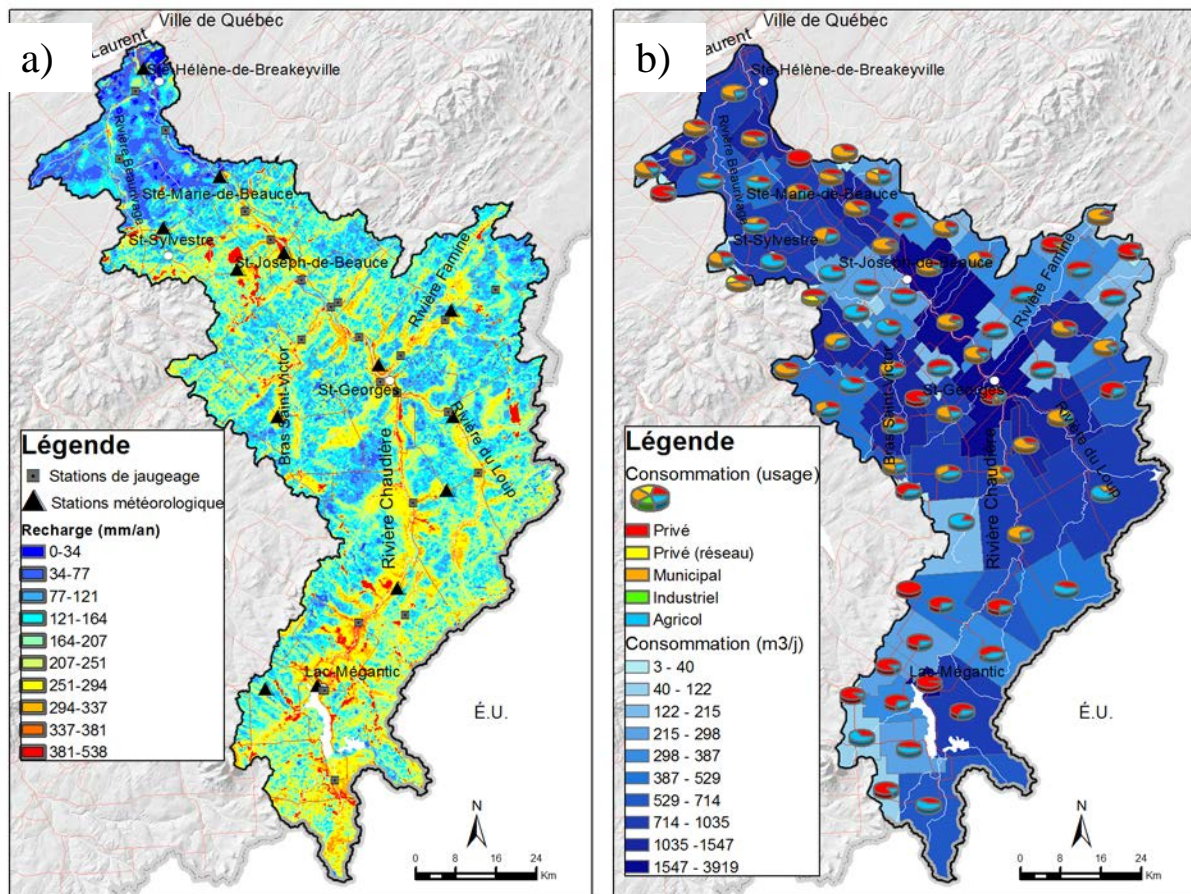
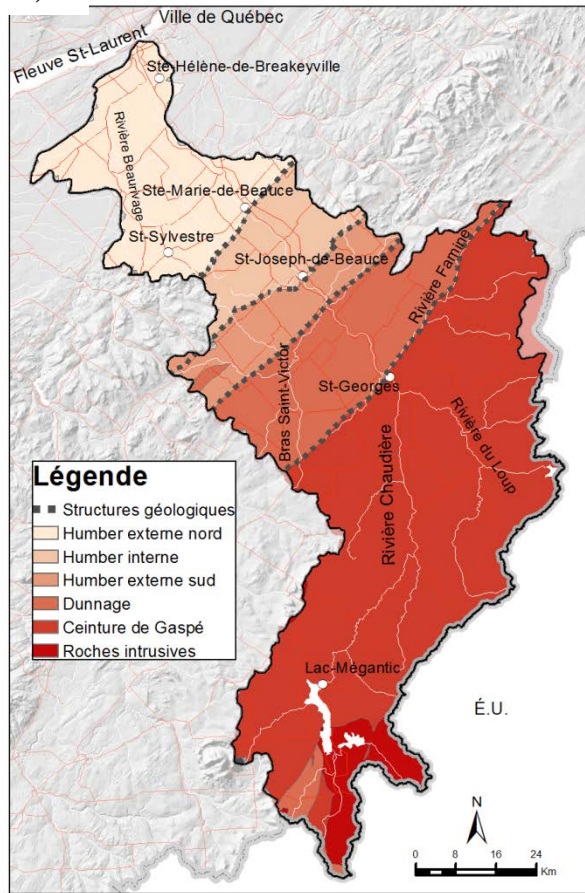
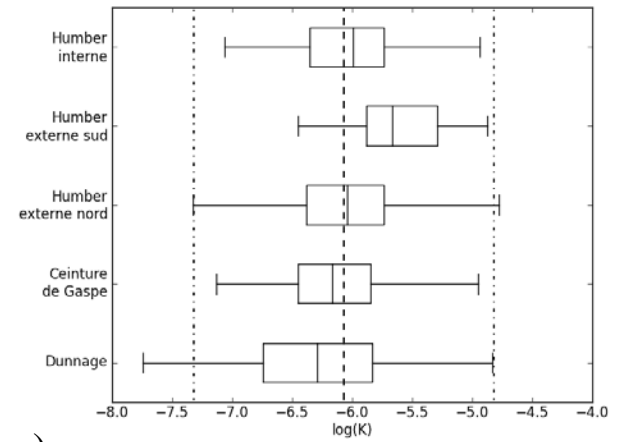


Figure 2. Paramètres du modèle numérique montrant : a) la recharge distribuée, et b) l'utilisation et la consommation de l'eau souterraine.

a)



b)



c)

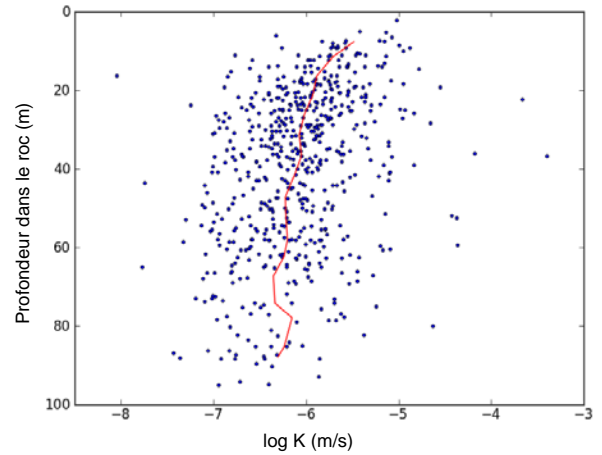


Figure 3. Géologie et conductivité hydraulique ( $K$ ) du modèle : a) Carte tectonostratigraphique simplifiée et valeurs de la conductivité hydraulique exprimée en logarithme selon b) les unités tectonostratigraphiques, et c) la profondeur (trait rouge correspond à la moyenne mobile de  $\log K$  sur 5 m).

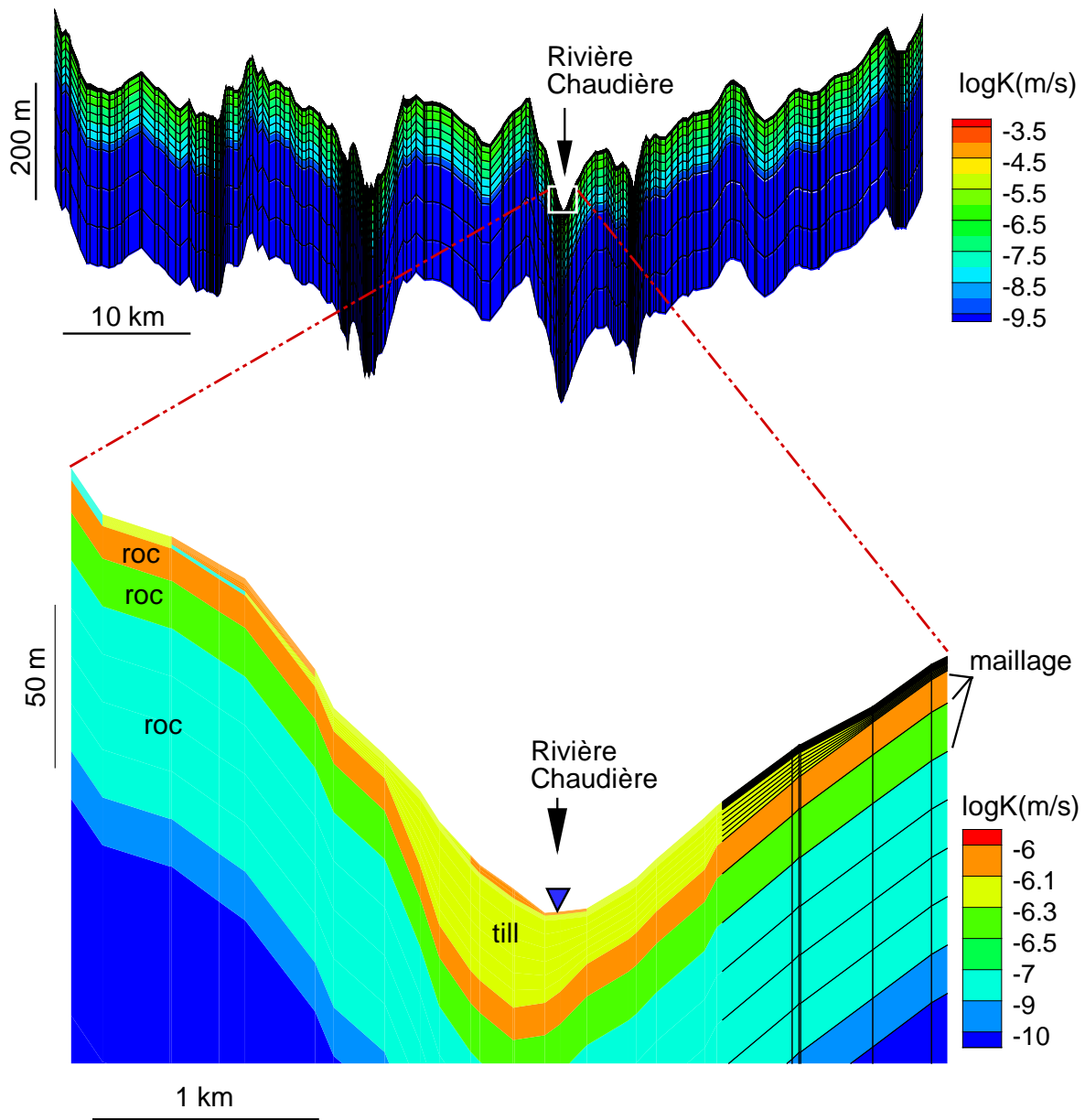


Figure 4. Distribution de la conductivité hydraulique ( $K$ ) pour les dépôts meubles et le roc à travers une coupe verticale (localisation  $y = 5.113 \times 10^6$  m).

## **2.3 Modélisation numérique**

Le calage du modèle a été effectué sur 1721 mesures de niveau d'eau ayant servi à définir la piézométrie du bassin qui est montré à la figure 5a. Les charges hydrauliques simulées en régime permanent sont montrés à la figure 5b (vue en plan au niveau de la nappe phréatique). Les résultats montrent une bonne correspondance entre la distribution spatiale des valeurs observées et simulées, où les charges hydrauliques varient de ~1,000 m dans les hauts topographiques au sud à ~0 m à l'exutoire du bassin dans le fleuve St-Laurent. Les gradients hydrauliques (horizontaux) régionaux ainsi que les directions générales d'écoulement sont aussi bien représentés par le modèle. Le calage est basé sur l'ajustement des conductivités hydrauliques et de leur anisotropie ( $K_x/K_z$ ).

La figure 6 présente l'ajustement entre les charges simulées et mesurées. L'écart type du calage est de 39.9 m et l'erreur moyenne est de -0.1 m. Bien que le calage soit raisonnable et acceptable pour les objectifs de l'étude, des écarts importants sont évidents. Ces écarts représentent non seulement des erreurs de calage, mais également celles dues aux simplifications dans le modèle conceptuel. Par exemple, la géologie et l'hydrostratigraphie ont été simplifiées, et le modèle est basé sur un milieu poreux équivalent; des fractures discrètes au roc ne sont pas incluses. De plus, les charges observées ont été mesurées sur plusieurs années sur différentes saisons et donc elles incluent des variations temporelles tandis que la simulation, étant en régime permanent, représente une condition moyenne. Finalement, pour plusieurs puits on ne connaît pas exactement la profondeur de l'ouverture du puits (la crepine). Pour ces puits, on a utilisé l'élévation de la surface du roc comme niveau d'exploitation. La figure 7 présente les charges simulées en 3D.

Trois coupes verticales, localisées à la figure 8a, ont été choisies pour montrer les charges simulées en fonction de la profondeur (Figure 9). La figure 9 montre que les gradients horizontaux sont dominants, entre les hautes élévations aux limites ouest-est (isocontours orange-rouge) et les rivières au centre du bassin (isocontours bleu), puisque les isocontours sont essentiellement verticaux (écoulement perpendiculaire aux isocontours). Les gradients hydrauliques verticaux étant difficiles à voir en coupe 2D (dû à l'exagération verticale), des profils verticaux 1D des charges ont été extraits des coupes pour 9 localisations représentatives soient : quatre dans des zones de recharge avec des gradients positifs (écoulement vers le bas; figures 9a,d,f,i); et cinq dans des zones de résurgence avec des gradients négatifs (écoulement

vers le haut; figures 9b,c,e,g,h). Tel qu'illustré, les gradients verticaux sont nettement plus importants dans le roc où le contraste de conductivité hydraulique vertical est généralement plus marqué que dans les dépôts meubles. En dessous de la rivière Chaudière (Figures 9b,e,h), les gradients verticaux vers le haut sont très importants, ce qui représente une zone de résurgence régionale pour les eaux souterraines. Néanmoins, il faut noter que dans la plupart des cas, les eaux souterraines s'écoulent dans les aquifères supérieures du système, soit dans les unités perméables des dépôts meubles – (graviers, sables et silts), où dans le roc très fracturé.

Les forts gradients hydrauliques verticaux indiquent que la solution numérique est assez fiable. En effet, ce type de gradient est souvent difficile à reproduire pour un tel bassin qui présente une différence d'échelle importante entre l'échelle horizontale (xy, de l'ordre de ~100 km) par rapport à l'échelle verticale (300 m). Cette difficulté est causée soit par l'anisotropie ou les contrastes dans le champ de conductivité hydraulique. Notons que des coupes additionnelles sont disponibles dans les travaux de Brune Koné (2013).

À partir des gradients hydrauliques simulées, le modèle WATFLOW calcule aussi les vitesses d'écoulement des eaux souterraines en 3D, qui sont définies au centroïde de chaque élément. A partir des vitesses, on peut suivre les lignes d'écoulement avec la méthode de traçage de particules, par exemple dans ce cas, avec le logiciel de visualisation TECPLOT (Amtec Engineering, 2014) qui utilise la méthode d'intégration de Runge-Kutta, du 4<sup>e</sup> ordre. Des lignes d'écoulement en régime permanent pour le bassin versant de la Chaudière sont montrées à la figure 10. Les particules ont été placées aléatoirement à la surface du modèle près des limites de partage des eaux des sous-bassins et près des cours d'eau. Ensuite, le traçage a été effectué dans de manières directes (vers l'aval) à partir des limites des sous-bassins et de manière inverse (vers l'amont) à partir des cours d'eau. Le traçage de particules permet ainsi de bien définir les directions d'écoulement et les limites des sous-bassins.

Sur cette figure, les lignes d'écoulement définissent de nombreux sous-bassins avec leurs propres zones de recharge et de résurgence correspondantes aux rivières secondaires ou bien à un segment de la rivière Chaudière. Ces limites de partage des eaux souterraines correspondent assez bien à celle des sous-bassins du réseau hydriques. De plus, l'analyse de ces mêmes lignes d'écoulement, montrées en perspective 3D à la figure 11, révèle que l'écoulement est focalisé près de la surface dans les dépôts meubles et la partie supérieure du roc fracturé. Les taux d'écoulement en profondeur sont apparemment assez faibles, avec peu d'écoulement régional en profondeur.



Les résultats de la modélisation numérique pourraient être utilisés pour différentes applications à l'échelle régionale comme par exemple identifier les aires d'alimentation des rivières, les zones vulnérables à protéger ou bien pour planifier d'autres études hydrogéologiques à l'échelle locale dans des secteurs d'intérêt.

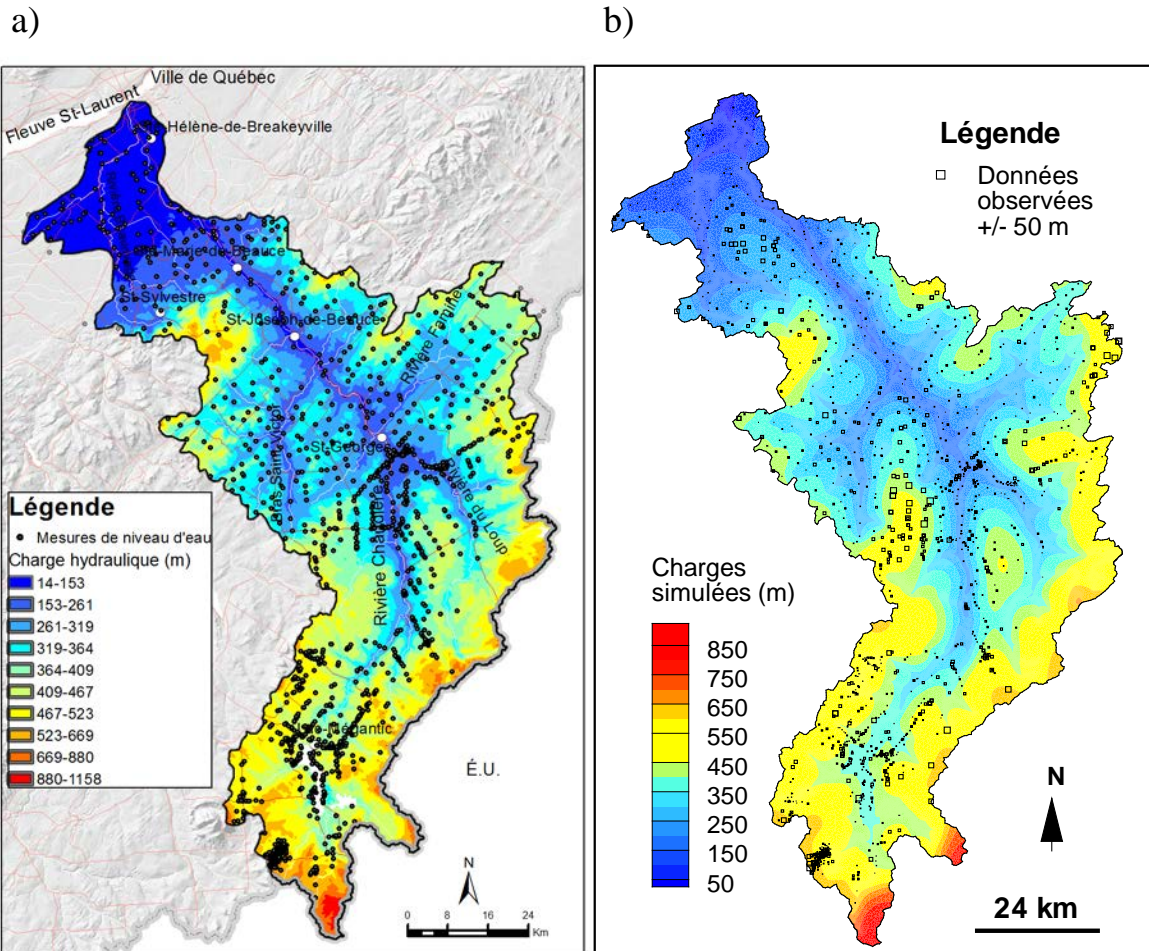


Figure 5. Simulation numérique calée : a) piézométrie observée et b) charges simulées (vue en plan).

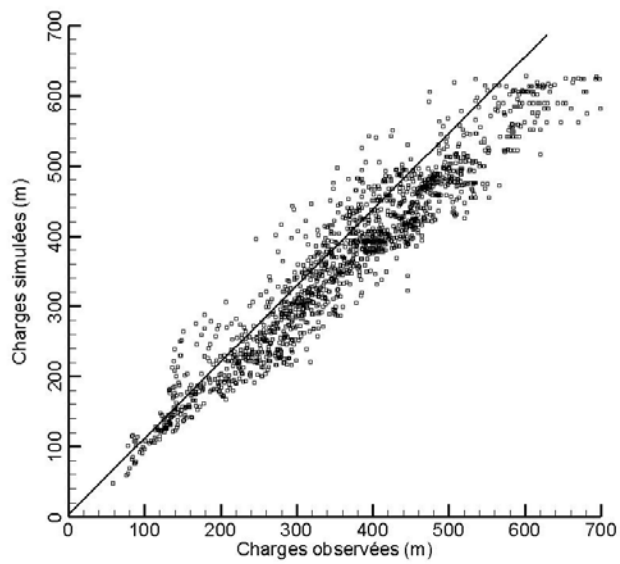


Figure 6. Graphique binaire des charges observées vs charges simulées.

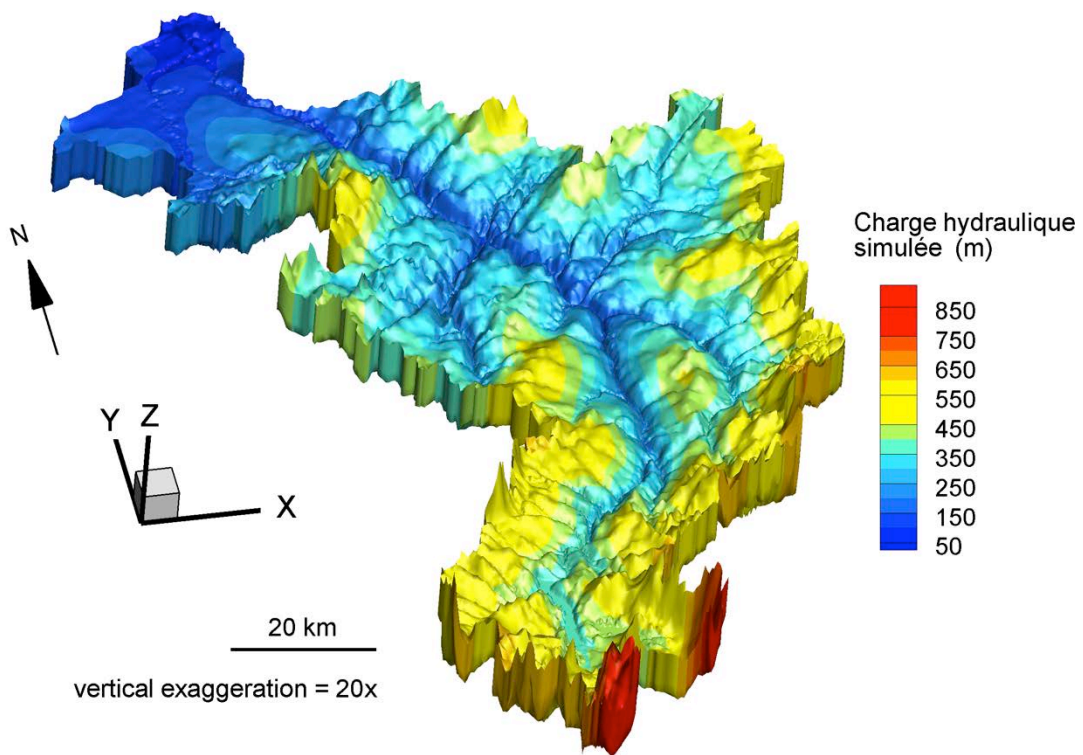


Figure 7. Distribution 3D des charges hydrauliques simulées.

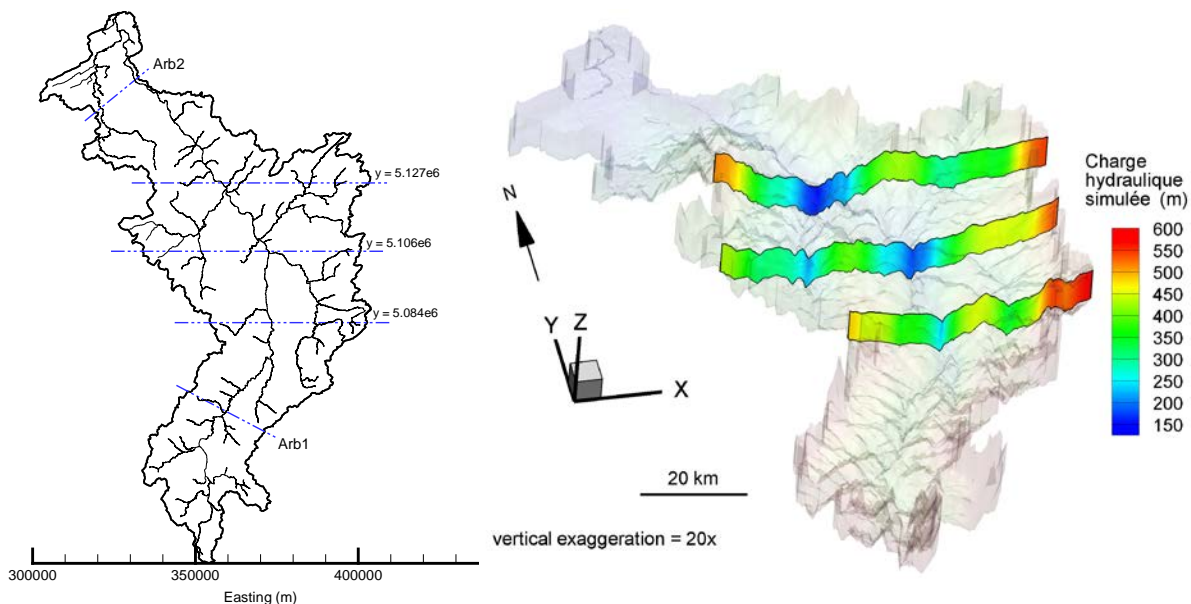


Figure 8. Localisation des coupes verticales pour les charges hydrauliques de la figure 9. Les charges dans les coupes 'Arb1' et 'Arb2' sont montrées dans Brun Koné (2013).

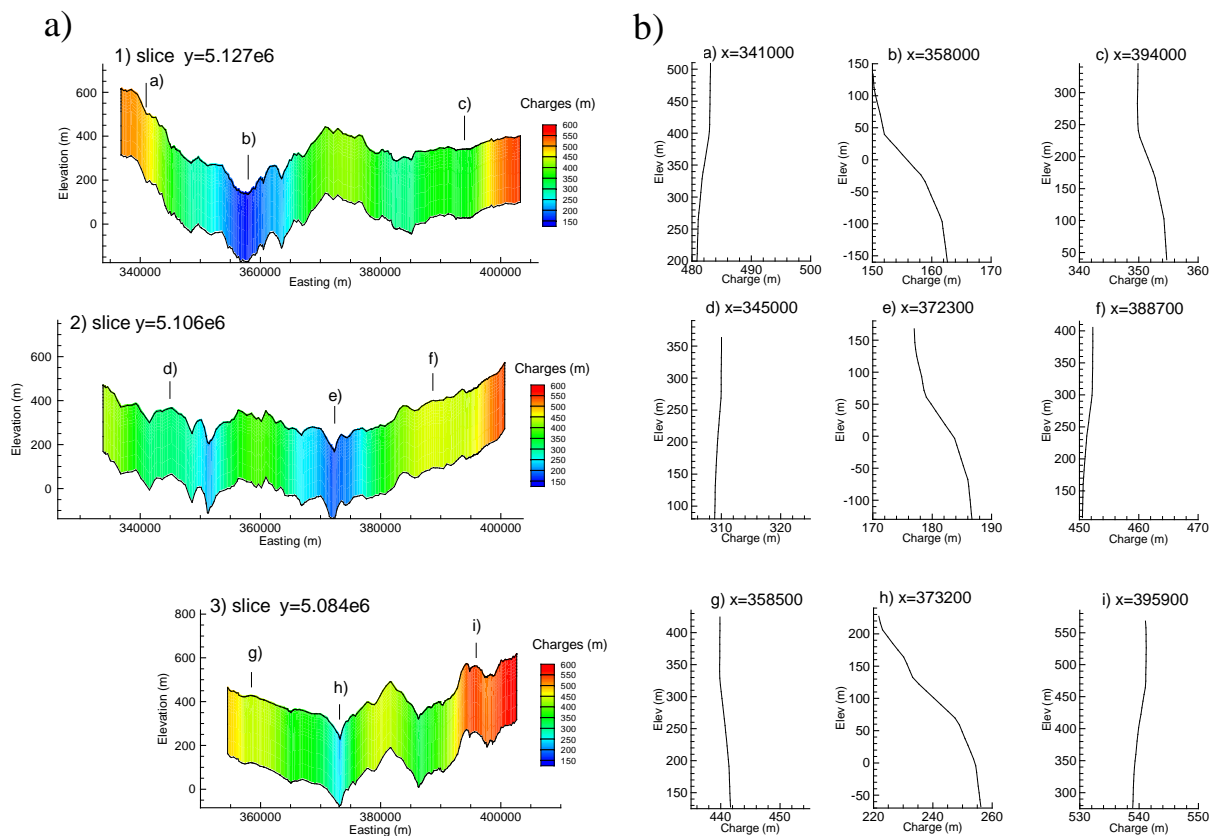


Figure 9. Charges hydrauliques simulées dans les coupes verticales transversales (montrées à la figure 8). a) isocontours des charges (exagération verticale  $\approx 40x$ ) ; b) les profils verticaux des charges aux points identifiés sur les coupes (les échelles sont identiques  $20m \times 310m$  sauf pour les charges du profil (h)  $40m \times 310m$ ). Les profils centraux (9 b,e,h) sont localisés en dessous de la rivière Chaudière.



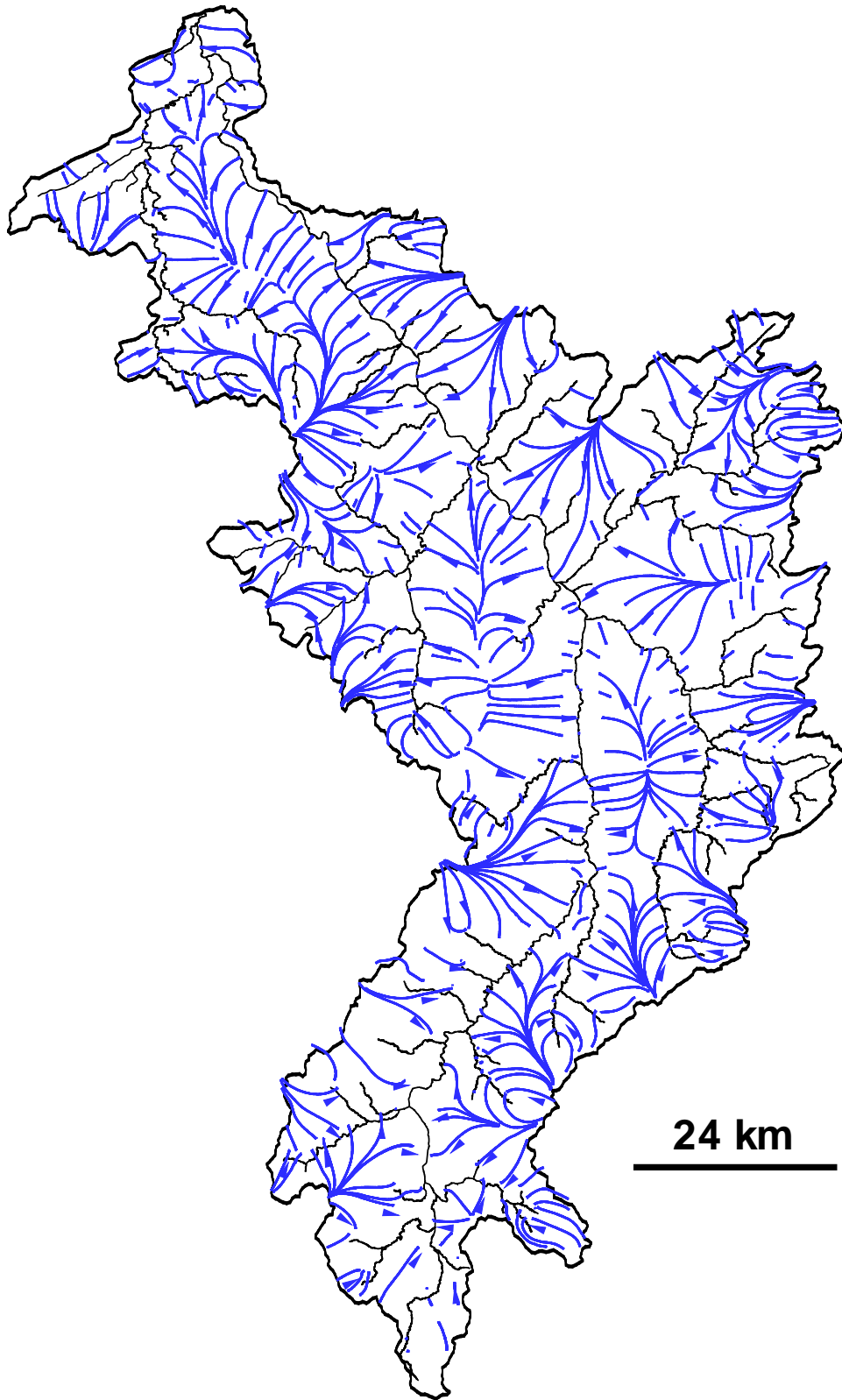


Figure 10. Lignes d'écoulement 3D ('streamlines') simulées à partir de points sélectionnés avec le modèle (vue en plan).

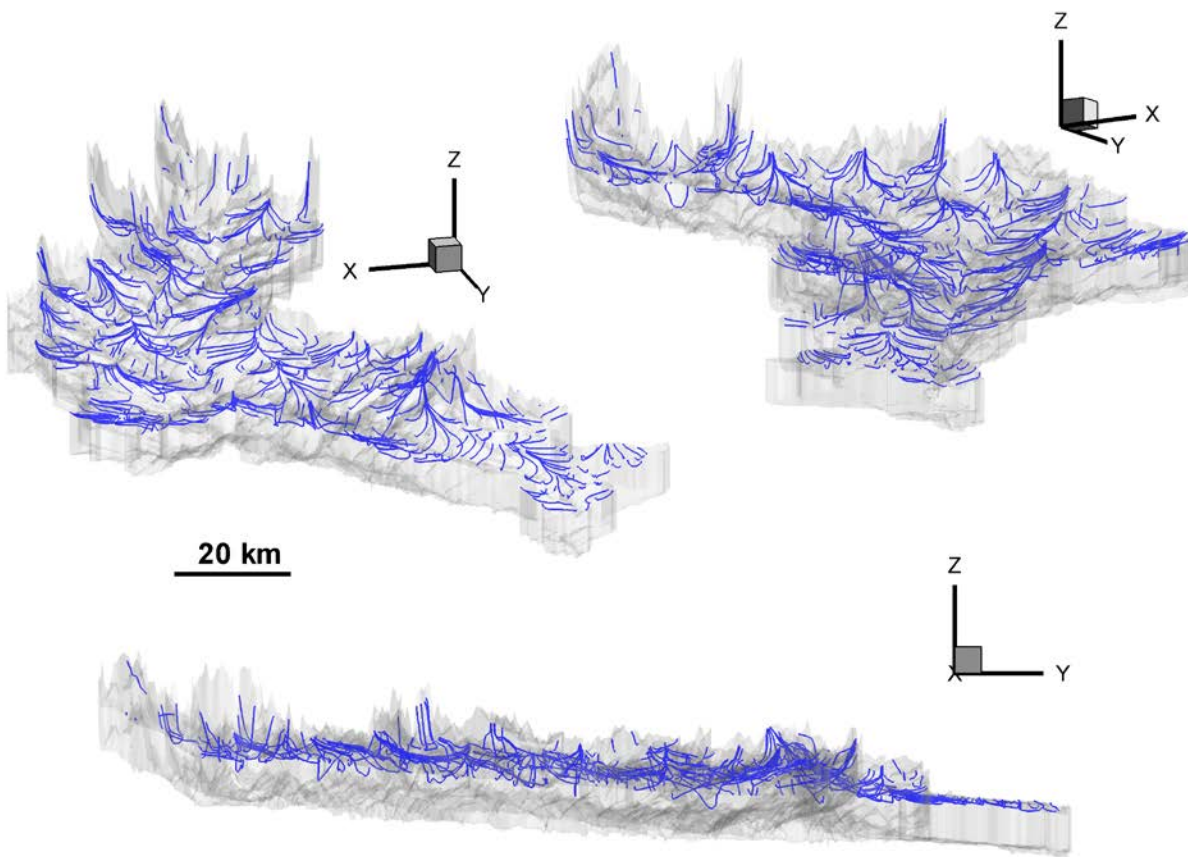


Figure 11. Lignes d'écoulement 3D ('streamlines') simulées avec le modèle (vue 3D en perspective). Pour cette figure, les points d'origines des lignes d'écoulement sont les mêmes que ceux de la figure 10.

### 3. Procédure d'utilisation du modèle

Cette section présente un court résumé de la procédure d'utilisation de WATFLOW. Les fichiers d'entrée pour la simulation du modèle calé sont présentés, incluant le fichier de contrôle (*watflow.con*), le maillage, les interfaces hydrogéologiques et les conditions aux limites (charges imposées et recharge). Bien que la plupart de ces fichiers soient difficile à modifier sans l'utilisation d'outils tels que ArcGIS (ESRI, 2011) et TRIANGLE (Shewchuk, 1996) par exemple, certains paramètres peuvent être modifiés de façon relativement simple, incluant la conductivité hydraulique, la recharge et les taux de pompage.

Il est recommandé d'utiliser un logiciel SIG (ex. ArcGIS) pour générer la surface topographique, les surfaces hydrostratigraphiques incluant la surface du roc, l'élévation de la base du modèle et les conditions frontières (ex. charges imposées). Il est suggéré d'utiliser le logiciel TRIANGLE (Shewchuk, 1996) pour produire le maillage triangulaire 2D. Le modèle WATFLOW peut ensuite être utilisé avec le fichier de contrôle *watflow.con* pour générer le maillage 3D, pour simuler l'écoulement 3D, pour produire les fichiers de sortie et pour caler le modèle. Pour une description détaillée du logiciel WATFLOW, le lecteur doit se référer à Molson et al. (2002).

Les fichiers de sortie contenant les résultats simulés (ex. les charges hydrauliques, saturations, vitesses d'écoulement) sont en format ASCII et formatés pour le logiciel graphique TECPLOT. Les fichiers électroniques tels que *watflow.exe* sont disponibles sur demande (voir section 4). Ensuite, le lecteur peut utiliser le modèle du bassin versant de la rivière Chaudière de la manière décrite dans les sections suivantes.

#### **3.1 Données d'entrée et le fichier de contrôle *watflow.con***

Examiner le fichier d'entrée *watflow.con*. Ce fichier de « contrôle » contient les informations sur le maillage 3D, les puits de pompage, les conductivités hydrauliques et les paramètres de modélisation (régime permanent ou transitoire, paramètres de convergence, etc.). Les noms des fichiers qui contiennent le maillage 2D, les surfaces hydrostratigraphiques, la distribution des unités géologiques (i.e. argile, sable, till, roc, etc.) et le type de données de sortie (ex. 2D, 3D, charges, saturation, vitesses, etc.) sont également identifiés dans ce fichier. Le tableau 1 présente tous les fichiers nécessaires pour lancer le modèle *watflow.exe*.

Tableau 1. Fichiers d'entrée du modèle WATFLOW pour le modèle de la Chaudière.

Nom du fichier	Contenu	Structure
<i>watflow.con</i>	Fichier de contrôle	ASCII
<i>watflow.exe</i>	Modèle : exécutable	WinOS
<i>chaudiere_utm19.xyc</i>	Coordonnées des nœuds 2D	Nœud, x, y
<i>chaudiere_utm19.in3</i>	Connectivité des éléments 2D	Élément#, 6 connections nœud = in(iel, 1-6)
<i>chaudiere_utm19.bni</i>	Nœuds aux limites	Liste de nœuds
<i>chaudiere_mne.dat</i>	Élévations des nœuds à la surface (modèle numérique d'élévation)	Liste d'élévations z(i)
<i>chaudiere_sable.dat</i>	<sup>3</sup> Élévations de nœuds : surface du sable	Liste d'élévations z(i)
<i>chaudiere_argile.dat</i>	Élévations de nœuds : surface de l'argile	Liste d'élévations z(i)
<i>chaudiere_gr1.dat</i>	Élévations de nœuds : surface du gravier	Liste d'élévations z(i)
<i>chaudiere_tillperm.dat</i>	Élévations de nœuds : surface du till perméable	Liste d'élévations z(i)
<i>chaudiere_till.dat</i>	Élévations de nœuds : surface du till	Liste d'élévations z(i)
<i>chaudiere_roc19.dat</i>	Élévations de nœuds : surface du roc	Liste d'élévations z(i)
<i>chaudiere_rk10.dat</i>	Élévations de nœuds : Élévations : $z = \text{roc} - 10 \text{ m}$	Liste d'élévations z(i)
<i>chaudiere_rk100.dat</i>	Élévations de nœuds : Élévations : $z = \text{roc} - 100 \text{ m}$	Liste d'élévations z(i)
<i>chaudiere_base_300.dat</i>	Élévations des nœuds à la base ( $z = \text{surface topo} - 300\text{m}$ )	Liste d'élévations z(i)
<i>chaudiere_ruisseaux.dat</i>	Nœuds aux ruisseaux	Liste de nœuds
<i>elem_arg.txt</i>	Éléments de la couche d'argile	Liste de type de sol à chaque élément (type 1-7) <sup>(1)</sup>
<i>elem_gr1.txt</i>	Éléments de la couche de gravier	Liste de type de sol à chaque élément
<i>elem_org.txt</i>	Éléments de la couche de sol organique	Liste de type de sol à chaque élément
<i>elem_sabl.txt</i>	Éléments de la couche de sable	Liste de type de sol à chaque élément
<i>elem_till.txt</i>	Éléments de la couche de till	Liste de type de sol à chaque élément
<i>elem_tillp.txt</i>	Éléments de la couche de till perméable	Liste de type de sol à chaque élément
<i>infiltr.ele</i>	Recharge par élément 2D	Recharge (mm/a) à chaque élément
<i>calib.dat</i>	Fichier de calage: charges observées	x,y,elev., charge, etc.
<i>wtchads.in</i>	Conditions initiales <sup>(2)</sup>	Charge hydraulique à chaque nœud

(1) Les sept types de sol utilisés par le modèle sont les suivantes : 1 - organique; 2 - sable; 3 - argile; 4 - gr1 (gravier); 5 - tillp (till perméable); 6 - till; 7 - roc (roc dans les couches d'éléments de till). Ces 7 types de sol sont identifiés dans la liste d'éléments 2D dans les fichiers .txt. Leurs conductivités hydrauliques sont définies dans le fichier *watflow.con*.

(2) Cette condition initiale peut provenir d'une simulation non-calée pour faciliter la convergence. Il faut choisir *init=2* dans *watflow.con*, et renommer le fichier de sortie *wtchads.out* (d'une simulation précédente avec *init=0* ou 1) à *wtchads.in*.

(3) Les fichiers 'Élévations de nœuds' représentent la surface supérieure de l'unité correspondante.

## 3.2 WATFLOW

Pour exécuter WATFLOW, il suffit de lancer le programme `watflow.exe` (ex. dans une fenêtre DOS) dans le même répertoire où se trouvent les fichiers d'entrée. L'évolution de la simulation sera imprimée sur l'écran (ex. les pas de temps, convergence etc.), et dans le fichier `watflow.lst`. À la fin de la simulation, vous devriez vérifier que vous avez bien « normal exit » à la fin du fichier `watflow.lst` (sinon, vérifiez les erreurs dans le fichier `watflow.dbg`).

## 3.3 Résultats

Pour visualiser les résultats des simulations à partir des fichiers correspondants, il est recommandé d'utiliser le logiciel TECPLOT. Tous les fichiers graphiques (ex. charges, saturations, vitesses) sont formatés pour TECPLOT. Les principaux fichiers de sortie de WATFLOW sont identifiés au tableau 2.

Simulation 2D/3D : Les données (ex., `tec.hds`, `tec.sat`) seront enregistrées en 2Dxy (vue en plan) si `ioutp=6`. Dans ce cas, les couches de nœuds et les couches d'éléments que l'utilisateur veut enregistrer sont identifiées dans le fichier `watflow.con`, par exemple :

```
5 7 11 14 21 30 ! nlaynod,(ilaynod(i),i=1,nlaynod) (ioutp = 2,4,6) <0=all layers
5 7 11 14 21 29 ! nlayelm,(ilayelm(i),i=1,nlayelm) (ioutp = 2,4,6) <0=all layers
```

où: `nlaynod`=numéro des couches de la grille de nœuds pour enregistrement des paramètres relatif aux nœuds (définit <0 pour toutes les couches), `ilaynod(i)`=numéros de la couche pour enregistrement des nœuds,  $i=1, nlaynod$ ), `nlayelm`=numéro des couches pour enregistrement des éléments (toutes les couches si <0), `ilayelm(i)`=numéros de couche pour enregistrement des éléments. Par exemple, dans ce cas, nous voudrions enregistrer les données sur 5 couches de nœuds: 7, 11, 14, 21 et 30, et sur 5 couches d'éléments: 7, 11, 14, 21 et 29 (couche #1 étant à la base).

Les données (ex., `tec.hds`, `tec.sat`) seront enregistrées en 3Dxyz si `ioutp=5`. Dans ce cas, les couches de nœuds et les couches d'éléments ne sont pas utilisées et les 2 lignes ci-hauts doivent être désactivées avec '!', par exemple :

```
!5 7 11 14 21 30 ! nlaynod,(ilaynod(i),i=1,nlaynod) (ioutp = 2,4,6) <0=toutes les couches
```

!5 7 11 14 21 29 ! nlayelm,(ilayelm(i),i=1,nlayelm) (ioutp = 2,4,6) <0=toutes les couches

Pour réduire la quantité d'information mise en mémoire, les coordonnées des nœuds ou des vitesses ne sont pas incluses avec les résultats simulés. Donc, afin de visualiser ces résultats, une fois la simulation terminée, il faut fusionner le fichier des coordonnées avec le fichier des résultats.

→ Voici un exemple qui permet de lire les fichiers résultats en 2D (avec *ioutp=6*) dans TECPLOT :

1) À partir d'une fenêtre DOS (invite de commande) faites :

- copy *tecscl.2dm + tec.hds = techds2D.plt*
- copy *tecvec.2dm + tec.vel = tecvec2D.plt*
- copy *tecscl.2dm + tec.srf = tecsr2D.plt*

2) Ouvrez ces fichiers *.plt* avec TECPLOT, en format 2D Cartésien (xy)

→ Voici un exemple qui permet de lire les fichiers résultats (avec *ioutp=5*) en 3D dans TECPLOT :

1) À partir d'une fenêtre DOS (invite de commande) faites :

- copy *tecscl.3dm + tec.hds = techds3D.plt*
- copy *tecvec.3dm + tec.vel = tecvec3D.plt*
- copy *tecscl.3dm + tec.srf = tecsr3D.plt*

2) Ouvrez ces fichiers *.plt* avec TECPLOT en format 3D Cartesian (xyz)

Autres fichiers :

- *ruisseaux-chaudiere-tecgeo.plt* : réseau des rivières en format géométrie TECPLOT
- *watflow.clb* : charges observées vs. charges simulées : format TECPLOT

La figure 12 schématise la procédure de modélisation avec le logiciel WATFLOW.

Tableau 2. Fichiers de sortie du modèle WATFLOW pour le modèle de la Chaudière.

Nom du fichier	Contenu	Structure
watflow.lst	Fichier de sortie de base	Variable, liste de données d'entrée, nom des fichiers, etc.
watflow.dbg	'debug'	Variables, liste de nœuds, éléments, messages d'erreur etc.
watflow.mbl	Bilan de masse	Flux aux nœuds fixés, recharge totale etc.
watflow.clb	Calibration	données de calibration (charges observées vs simulées)
tec.hds	Charges hydrauliques aux nœuds	Liste des charges : nœuds 1 – nn, en 2D ou 3D
tec.sat	Saturations aux nœuds	Liste des saturations : nœuds 1-nn (2D ou 3D)
tec.vel	Vitesses aux éléments	Liste des vitesses par élément (2D : $V_x, V_y$ ou 3D : $V_x, V_y, V_z$ )
tec.con	Conductivités hydrauliques	Liste de $K_x$ aux éléments (1-ne) 2D ou 3D.
tec.srf	Élévations des surfaces hydrostatiques	Élévations par nœuds (2D ou 3D)
tecscl.2dm & tecscl.3dm	Coordonnées des nœuds; pour combiner avec tec.hds, tec.sat ou tec.srf	2D : liste de coordonnées x,y en 2D par nœud 3D : liste de coordonnées x,y,z en 3D par nœud
tecvec.2dm & tecvec.3dm	Coordonnées des centroïdes des éléments; pour combiner avec les vitesses (tec.vel)	2D : liste de coordonnées x,y en 2D 3D : liste de coordonnées x,y,z en 3D
tecelm.2dm & tecelm.3dm	Coordonnées des noeuds des éléments; pour combiner avec les conductivités tec.con	2D : liste de coordonnées x,y en 2D 3D : liste de coordonnées x,y,z en 3D
tecvec-block3dvel.plt	Vitesses 3D	Formaté pour le traçage de particules avec TECPLOT
wtchheads.out	Fichiers des charges 3D qui pourraient être utilisé pour la condition initiale	Liste des charges par nœud en 3D
tec_xyrecharge.dat	Recharge par élément	TECPLOT

Note : les résultats sont enregistrés en 2D si la valeur  $ioutp=6$  (dans le fichier *watflow.con*), ou en 3D si la valeur  $ioutp=5$ . Si on choisit 2D, il faut identifier quelles couches de nœuds et d'éléments que l'on voudrait enregistrer.

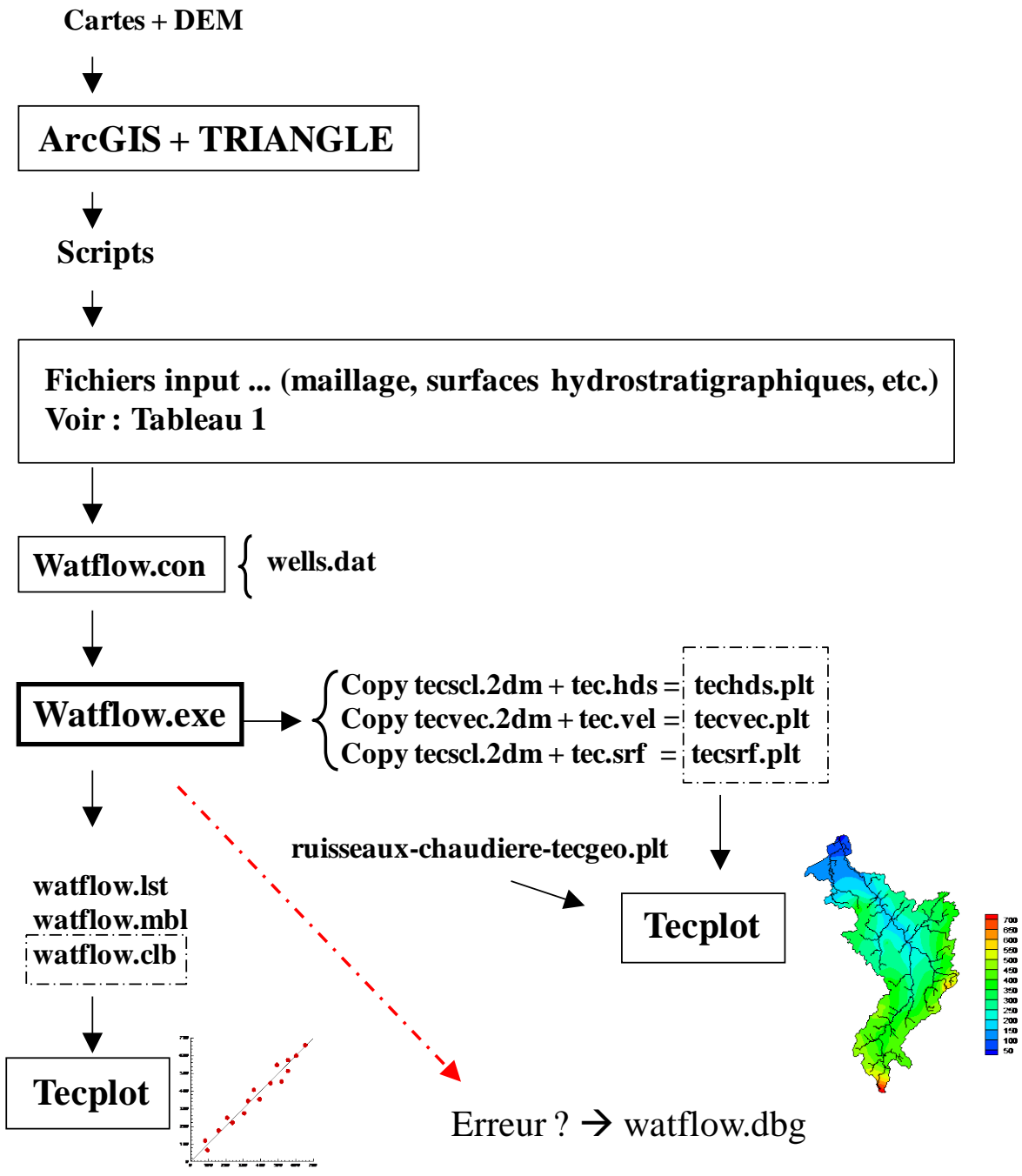


Figure 12. Procédure de modélisation avec le logiciel WATFLOW. L'exemple ci-haut assume que l'utilisateur a demandé les fichiers de sorties en 2D (ex., *copy tecsc1.2dm + tec.hds*). Pour les fichiers de sortie en 3D (si *ioutp=6*), on ferait, par exemple : (*copy tecsc1.3dm + tec.hds*).



## 4. Limite et droit d'utilisation

Le lecteur intéressé par l'utilisation du modèle numérique (fichier exécutable et fichiers d'entrées) à des fins de recherche ou d'enseignement, doit en faire la demande par écrit au professeur John Molson au Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval ([john.molson@ggl.ulaval.ca](mailto:john.molson@ggl.ulaval.ca)<<mailto:john.molson@ggl.ulaval.ca>>).

## 5. Références

Amtec Engineering 2014. TECPLOT User's Manual, *Tecplot 360 EX 2014 Release 2*. Bellevue, Washington: Amtec Engineering.

Beckers, J. and E.O. Frind, 2001. Simulating groundwater flow and runoff for the Oro Moraine aquifer system. Part I. Model formulation and conceptual analysis. *J. of Hydrology*, 229(3-4): 265-280.

Benoît, N., Nastev, M., Tremblay, L., Brun Koné, M., Molson, J.W., Lefebvre, R. 2012. Hydrogeology of the Chaudière River Watershed, Québec, 39th IAH Congress: IAH Canada 2012 Congress, Niagara Falls, 16-21 September.

Bradbury, K.R., and Rothschild, E.R. 1985. A computerized technique for estimating the hydraulic conductivity of aquifers from specific capacity data. *Groundwater*, 23(2): 240- 246.

Brun Koné, M.Y. 2013. Mémoire, Développement d'un modèle numérique d'écoulement 3D des eaux souterraines du bassin versant de la Rivière Chaudière, Québec. Université Laval Département de géologie et de génie géologique, Québec, 74 p.

ESRI, 2011. ArcGIS Desktop : Release 9.3. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

Comission Géologique du Canada (CGC), 2013. Programme géoscientifique des eaux souterraines de 2009-2014. Commission géologique du Canada (CGC). Ressource Naturelle Canada. Site internet : <http://www.mcan.gc.ca/sciences-terre/a-propos/programme-actuel/geoscience-eaux-souterraines/3485>

Molson, J.W., Beckers, J., Frind, E.O., and Martin, P.J. 2002. WATFLOW/3D v4.0 User Guide, A 3D Groundwater Flow Model, Department of Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo.

Schroeder, P. R., T. S. Dozier, P. A. Zappi, B. M. McEnroe, J. W. Sjostrom, and R. L. Peyton. 1994. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3, EPA/600/R-94/168b, September 1994. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development.

Shewchuk, J.R., 1996. Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator, in : Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering' (Ming C. Lin and Dinesh Manocha, editors), volume 1148 of Lecture Notes in Computer Science, pages

203-222, Springer-Verlag, Berlin.

Strahler, A. N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology, Transactions of the American Geophysical Union 38 (6): 913–920, doi:10.1029/tr038i006p00913.

# Annexe

## Fichier de contrôle *watflow.con*

À titre d'exemple, voici le fichier *watflow.con* pour la simulation calée. (Noter que les lignes qui commencent avec '!' ne sont pas utilisées et l'option *ioutp=6* a été choisi donc les résultats seront enregistrés en 2D).

```
3D Flow Model - WATFLOW Model
Université Laval Chaudière River Basin
March 2012
!-----
! read general input/output switches
!   input = 1 GMS input
!           = 2 Gridbuilder input
!   ioutp = 1 3D GMS output (binary)
!           = 2 2D GMS output by layer (binary)
!           = 3 cross-sectional GMS output (binary)
!           = 4 Gridbuilder output (binary, always by layer)
!           = 5 3D Tecplot output (ascii)
!           = 6 2D Tecplot output by layer (ascii)
!           = 7 cross-sectional Tecplot output (ascii)
!   iclb = 0 no calibration data
!           = 1 output misfit statistics only
!           = 2 get sensitivity to input parameters using adjoint method
!   debug = .true. for debugging mode
!-----
2
6           !ioutp (5=3D output,6=2DTecplot)
1
.false.
./
chaudiere_utm19      !prefix of mesh files (.xyc, .in3, .bni)
10                ! # of nodal surface files - describing Kriged surfaces
chaudiere_base_300.dat
3                 ! # of layers of elements in bedrock
chaudiere_rk100.dat
6                 ! # of layers of elements above rk110 (top of rock-100)
chaudiere_rk10.dat
1                 ! # of layers of elements above rk10 (top of rock-10)
chaudiere_roc19.dat
6                 ! # of layers of elements from top of roc to top of till
chaudiere_till.dat
3
chaudiere_tillperm.dat
2
chaudiere_gr1.dat
3
```



```

2.0e-6
2.0e-6
2.0e-6
2.0e-6
2.0e-6
2.0e-5
0.1      !Kz/Kx ratios for each element layer; bottom to top
0.1      !Kz/Kx
0.1      !Kz/Kx
0.1      !Kz/Kx
0.1      !Kz/Kx
0.1      !Kz/Kx
0.1      !Kz/Kx
0.1      !Kz/Kx
0.2      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
1.0      !Kz/Kx !top layer of rock
0.5      !Kz/Kx !these next layers in overburden overwritten by K pointers below
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
0.5      !Kz/Kx
!-----
!subzones + calibration factors
0      !ncsz
1.0    factor(i)
!1.999406351
!1.998802521
!0.286479791
!0.290440294
!0.593634166
!2.000069178
!0.184464604
!0.186195504
1      !iznrsl=1 single zone rsl
.true. ! Uniform K within the RSL (.false.=Grid Builder file)
3.000E-03
!
! new for Chaudière - pointer arrays 1-7 - will only affect dépôts meubles above roc
!
1.e-5 1.e-5 !cpx(1), cpxz(1) organic Kx, Kz (m/s)
1.e-4 1.e-4 !cpx(2), cpxz(2) sable

```

```

1.e-9 1.e-9      !cpx(3), cpxz(3) argile
1.e-3 1.e-3      !cpx(4), cpxz(4) gr1
1.e-5 1.e-5      !cpx(5), cpxz(5) tillp
6.e-7 2.e-7      !cpx(6), cpxz(6) till
1.e-6 1.e-6      !cpx(7), cpxz(7) roc (only for roc within till layer)
!-----
! read in the pumping/injection well data
! - for non-zero well radius use 1D line elements
! - for zero well radius directly apply pumping rates to corresponding nodes
! npwxy      = number of pumping wells
! pfactor    = factor to multiply all pumping rates by
! ipxy       = nodal index for well in xy-plane
! iplay1,iplay2 = bottom/top layer for well screen
! pqtot      = total pumping rate (+ = injection, - = withdrawal)
! wrad       = radius of well
!-----
! NEW Q 1999
68          ! number of pumping wells (-ve rate = pumping)
1.00        ! factor to multiply all pumping rates by
51201 11 11 -3.02E-03 2.00E-01 ; node 2Dxy, z1-z2 well screen, Q m3/s, well radius (m)
54059 11 11 -1.85E-03 2.00E-01
13188 11 11 -1.16E-03 2.00E-01
55085 11 11 -2.57E-03 2.00E-01
48647 11 11 -4.75E-03 2.00E-01
55339 11 11 -2.37E-03 2.00E-01
57455 11 11 -5.79E-03 2.00E-01
27148 11 11 -3.47E-03 2.00E-01
22287 11 11 -4.75E-03 2.00E-01
52625 11 11 -3.01E-03 2.00E-01
14833 11 11 -2.35E-03 2.00E-01
59159 11 11 -1.15E-03 2.00E-01
33685 11 11 -4.46E-03 2.00E-01
36057 11 11 -5.21E-04 2.00E-01
57754 11 11 -1.67E-03 2.00E-01
51355 11 11 -2.31E-04 2.00E-01
44572 11 11 -3.85E-04 2.00E-01
57247 11 11 -1.16E-03 2.00E-01
22817 11 11 -3.18E-03 2.00E-01
47138 11 11 -3.09E-03 2.00E-01
60059 11 11 -1.27E-03 2.00E-01
47985 11 11 -1.55E-03 2.00E-01
52779 11 11 -5.79E-03 2.00E-01
5545 11 11 -2.34E-04 2.00E-01
49322 11 11 -2.14E-03 2.00E-01
56583 11 11 -7.89E-03 2.00E-01
54959 11 11 -2.31E-04 2.00E-01
54957 11 11 -2.31E-04 2.00E-01
38845 11 11 -7.64E-03 2.00E-01
54709 11 11 -3.47E-03 2.00E-01
53560 11 11 -1.74E-04 2.00E-01
52413 11 11 -4.92E-03 2.00E-01
57918 11 11 -4.86E-04 2.00E-01
57832 11 11 -3.85E-04 2.00E-01
53447 11 11 -4.63E-03 2.00E-01

```

```

55243 11 11 -2.37E-03 2.00E-01
58445 11 11 -3.47E-03 2.00E-01
56015 11 11 -1.15E-03 2.00E-01
57107 11 11 -2.55E-03 2.00E-01
56145 11 11 -5.21E-04 2.00E-01
49749 11 11 -4.75E-03 2.00E-01
54057 11 11 -4.17E-03 2.00E-01
56920 11 11 -7.85E-03 2.00E-01
55513 11 11 -5.67E-04 2.00E-01
51162 11 11 -8.10E-04 2.00E-01
48992 11 11 -5.09E-03 2.00E-01
35681 11 11 -4.63E-04 2.00E-01
19049 11 11 -4.83E-03 2.00E-01
54629 11 11 -1.63E-03 2.00E-01
9830 11 11 -3.67E-03 2.00E-01
34792 11 11 -8.84E-03 2.00E-01
55657 11 11 -6.94E-04 2.00E-01
55539 11 11 0.00E+00 2.00E-01
18924 11 11 -5.14E-04 2.00E-01
58989 11 11 -2.25E-03 2.00E-01
46447 11 11 -5.14E-04 2.00E-01
28459 11 11 -5.14E-04 2.00E-01
57330 11 11 -2.37E-03 2.00E-01
55923 11 11 -6.94E-03 2.00E-01
36734 11 11 -3.67E-03 2.00E-01
56947 11 11 -1.16E-03 2.00E-01
56852 11 11 -1.16E-03 2.00E-01
8829 11 11 -2.89E-04 2.00E-01
43003 11 11 -1.55E-03 2.00E-01
59519 11 11 -4.17E-03 2.00E-01
40061 11 11 -4.75E-03 2.00E-01
51070 11 11 -5.44E-04 2.00E-01
46591 11 11 -1.16E-03 2.00E-01
!-----
.false. .false. .false.          !adj_hds,adj_vel,adj_flx
!-----
.true.          ! steady-state?
2 500.          ! init,"value" 0=fixed, 1=topo, 2=read from wtheads.in (renamed from wtheads.out)
!-----
4              ! kwt
0.00001 0.0001 25          ! ccw,ccu,maxit2 (if kwt > 0)
0.1 2          ! umx (if kwt > 0), irelax (if kwt=3,4)
!.true.        ! updateK (if kwt = 1,2)
.1 0.2        ! rsat, alpha (if kwt=3,4)
.false.       ! do_seep (if kwt > 0)
!3. 5        ! ccs, ncs (if kwt > 0 and do_seep)
!-----
.true.        ! HAR_PCG
1            ! iprism
!-----
! if iclb>0, read name of calibration file
2            ! calibration norm
./Calib.dat
0            !ncalflx

```

```

0                !ncalrsl
!-----
! flags ...
.true.           ! write hydraulic heads
.true.           ! write elemental saturation
.true.           ! write water table position
.true.           ! write velocity vectors
.true.           ! write recharge w_rch
.false.          ! write detailed fluxes at type I/seepage nodes
.true.           !w_srf
.true.           !w_con
.false.          !w_etr
.false.          !w_utr
! -----
! output layer specifications (for 2D ouput when ioutp=6)
! nlaynod        = number of layers for 2D nodal output (set < 0 for all layers)
! ilaynod        = layer numbers for 2D nodal output
! nlayelm        = number of layers for 2D elemental output (all layers if < 0 )
! ilayelm        = layer numbers for 2D elemental output
! igb_nod,elm,vec = starting suffix numbers for nodal,elemental,vector output
! -----
5 7 11 14 21 30   ! nlaynod,(ilaynod(i),i=1,nlaynod) (ioutp = 2,4,6) <0=all layers
5 7 11 14 21 29   ! nlayelm,(ilayelm(i),i=1,nlayelm) (ioutp = 2,4,6) <0=all layers
!9 9 1           ! igb_nod,elm,vec (Gridbuilder, ioutp = 4 only)
!bound.lst       ! list of 2D nodes for cross-section (ioutp = 3,7)
!2              !xs_type (1=straight line distance, 2 = true length)
.false.          ! write AVS output
.true.           ! write WTC final solution (wtc*.* )
.false.          ! write final (deformed) GMS meshes
.true.           ! write final (deformed) Tecplot meshes
! -----
! time steps (days)
0. 1.0 1.0 1      ! tstart,tend,dt,kplot

```