Université du Québec
INRS-Eau, Terre et Environnement

Développement d'une procédure d'évaluation de la recharge pour le modèle hydrogéologique MODFLOW à partir du modèle hydrologique HYDROTEL

Par
Julie L'Heureux

Mémoire
Pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Directeur de recherche	Jean-Pierre Villeneuve
Codirecteur(s)	Claudio Paniconi et Alain N. Rousseau
Examinateur interne	Miroslav Nastev
Examinateur externe	Pierre Gélinas

Août 2005

© Tous droits réservés de Julie L'Heureux, 2005

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je tiens à remercier M. Jean-Pierre Villeneuve, directeur du centre INRS-Eau, Terre et Environnement, de m'avoir offert la possibilité de réaliser un projet de maîtrise dans son équipe de recherche et donné les moyens pour accomplir ce travail. En partageant son expérience, il a su me supporter, me guider et surtout m'appuyer dans toutes les situations. Mille fois merci...

J'exprime également ma reconnaissance aux examinateurs et codirecteurs. M. Claudio Paniconi et M. Alain N. Rousseau pour leur participation ainsi que pour leurs remarques constructives tout au long de la thèse. Je veux aussi citer M. Miroslav Nastev et M. Pierre Gélinas pour avoir accepté d'être mes examinateurs interne et externe.

Je tiens aussi à remercier le personnel de l'INRS-ETE et je voudrais citer Alain Royer, Claude Blanchette, Sébastien Tremblay, Vincent Pellé, Marc Philippin, Jean-Pierre Fortin, Jean-Daniel Bourgault, Étienne Ringuet, Patrick Laforte, Diane Tremblay et Julie Julien pour leurs conseils, temps et bonne humeur.

Finalement, je voudrais remercier particulièrement pour leur patience, amour et support, Patrick Moreau, ma mère Francine, ma tante Diane et mes amis : Jean-François Dolbec, Cindy Simard, Dominique Petit, Annie Poulin, Parnell Pierre, les filles... et tous les autres.

TABLE DES MATIÈRES

1.0 Introduction..... 1

1.1 Objectifs..... 1

1.2 Contenu de ce mémoire..... 2

2.0 Revue de littérature 3

2.1 Techniques pour quantifier la recharge souterraine 3

2.1.1 Terminologie 3

2.1.2 Les informations de base pour estimer la recharge 5

2.1.3 Les différentes techniques pour estimer la recharge 6

2.2 Modélisation hydrologique et description d'HYDROTEL 9

2.2.1 Description d'HYDROTEL..... 10

2.2.2 Système de drainage 10

2.2.3 Affectation des sols et pédogéologie du milieu souterrain...11

2.2.4 Caractéristiques générales 11

2.2.5 Interpolation des précipitations 13

2.2.6 Accumulation et fonte du couvert nival 13

2.2.7 Évapotranspiration potentielle 14

2.2.8 Bilan hydrique vertical 14

2.2.9 Bilan hydrologique 19

2.2.10 Conclusion à propos du modèle hydrologique HYDROTEL ..19

2.3 Modélisation hydrogéologique 20

2.3.1 Présentation des modèles hydrogéologiques potentiels 23

2.3.1.1 FEFLOW 23

2.3.1.2 MODFLOW 23

2.3.1.3 SUTRA 31

2.3.1.4 SWIFT 31

2.4 Principes de base des mécanismes d'interaction entre l'eau de surface et l'eau souterraine 31
2.5 Conclusion 32

3.0 Simulations d'HYDROTEL 33
3.1 Préparation de la base de données pour accomplir les simulations...33
3.2 Application courante du modèle 34
3.2.1 Données utilisées dans les simulations 34
3.2.2 L'approche du calage et de la validation 35
3.3 Les résultats 36
3.4 Discussion 37

4.0 Gestion de l'eau souterraine 39
4.1 Virage de la gestion de l'eau souterraine au Québec 39
4.2 Problématique de gestion de l'eau souterraine avec GIBSI 40
4.3 Objectifs futurs 41

5.0 Description de la zone à l'étude 43
5.1 Localisation et caractéristiques du bassin versant de la Famine 43
5.2 Géologie 45
5.2.1 Géologie du socle rocheux 45
5.2.2 Géologie de surface 49
5.3 Description des conditions de la qualité de l'eau 51
5.4 Inventaire des utilisateurs de l'eau souterraine 52
5.5 Conclusion 53

6.0 Provenance et description des données utilisées pour la mise en place du modèle conceptuel (MODFLOW) 55
6.1 Informations physiques 56

6.1.1 Carte géologique et coupes montrant les frontières régionales et verticales du système 56
6.1.2 Carte topographique 56
6.1.3 Épaisseur des sédiments 58
6.2 Informations hydrologiques 58
6.2.1 Conductivité hydraulique 58
6.2.2 Stratigraphie 58
6.3 Données de recharge 59
6.3.1 Procédure d'extraction des données 59
6.4 Conclusion 66

7.0 Construction du modèle numérique 67
7.1 Distribution des points de contrôle du niveau d'eau et de l'épaisseur des dépôts 67
7.2 Construction du modèle numérique 67
7.3 Caractérisation du maillage 71
7.4 Niveaux piézométriques mesurés sur le terrain 73
7.5 Caractérisation des rivières 75
7.6 Valeur par défaut 76
7.7 Conditions aux limites 77
7.8 Conclusion 77

8.0 Simulations avec MODFLOW 79
8.1 Analyse de sensibilité 79
8.1.1 Définition de l'analyse de sensibilité 79
8.1.2 Méthode 79
8.1.3 Résultats 80
8.2 Calage des données 84
8.2.1 Méthode d'essai et erreur et définition des conditions initiales 85

8.3 Évaluation des simulations....86
8.3.1 Comparaison du débit de base calculé par HYDROTEL et MODFLOW 88
8.4 Résultats des simulations 93
8.5 Conclusion 97

9.0 Conclusion et recommandations 99
9.1 Possibilités futures 100
9.2 Recommandations 101

10.0 Liste des références 105

Annexe A : Tableaux récapitulatifs de la Revue de littérature 112
Annexe B : Provenance et description des données utilisées pour la mise en place du modèle (MODFLOW).... 116
Annexe C : Guide d'utilisation du logiciel GMS 5.0.... 123
Annexe D : Points de contrôle pour la caractérisation de la stratigraphie.... 166

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Les différents mécanismes de recharges 4

Figure 2.2: Bilan vertical en trois couches du modèle HYDROTEL... 16

Figure 2.3 : Protocole des étapes d'application d'un modèle 21

Figure 2.4: Exemple d'une grille tridimensionnelle pour la simulation de l'écoulement souterrain 26

Figure 5.1 : Localisation du bassin versant de la Famine 44

Figure 5.2 : Géologie du socle rocheux du bassin versant de la Famine.....46

Figure 6.1 : Image du modèle numérique d'altitude du bassin versant de la Famine 57

Figure 6.2 : Variation de l'infiltration *q 2_3* pour chaque mois et un cumulatif pour l'année complète juin 2002 à mai 2003 62

Figure 6.3 : Variation de l'infiltration *q 2_3* pour chaque mois et un cumulatif pour l'année complète juin 2003 à mai 2004 63

Figure 6.4 : Précipitations pour la station St-Georges de mai 2002 à mai 2003 64

Figure 6.5 : Précipitations pour la station St-Georges de mai 2003 à mai 2004 65

Figure 7.1 : Carte des points d'observation du niveau d'eau sur le terrain (68) et d'épaisseur des sédiments de la base de données (403) 68

Figure 7.2 : Représentation visuelle des six couches du modèle numérique souterrain 69

Figure 7.3 : Image en plan de la couche de surface du bassin versant de la Famine tel que interpolé avec 403 points de contrôle 71

Figure 7.4 : Aperçu de la grille MODFLOW 2D du modèle conceptuel du bassin versant de la Famine 72

Figure 7.5 : Conditions limites à charges constante à l'exutoire du bassin versant de la Famine 76
Figure 8.1: Cibles de calage des niveaux piézométriques calculés par rapport aux niveaux piézométriques mesurés.....87
Figure 8.2 : Débits journaliers observés à la station Famine, débits de base calculés par HYDROTEL et MODFLOW (m^3/jr) pour la période juin 2002 à juin 2004 90
Figure 8.3 : Débits moyens mensuels observés à la station Famine, débits de base calculés par HYDROTEL et MODFLOW (m^3/jr) pour la période juin 2002 juin 2004 90
Figure 8.4: Débits de base calculés par HYDROTEL et MODFLOW (m^3/jr) pour la période juin 2002 à juin 2004 91
Figure 8.5 : Écoulement simulé par HYDROTEL et MODFLOW 93
Figure 8.6 : Comparatifs des données simulées par rapport aux données mesurées sur la première couche du modèle 95
Figure 8.7 : Histogramme des valeurs résiduelles des 68 points de contrôle 96
Figure C.1 : Exemple d'importation de la base de données à partir d'ACCESS 131
Figure C.2 : Exagération selon l'axe des Z 132
Figure C.3 : Relation entre les couches 135
Figure C.4 : Eenregistrement du TIN 138
Figure C.5 : Horizons to Solids 139
Figure C.6 : Création d'une grille 141
Figure C.7 : Options de MODFLOW 145
Figure C.8 : Choix des modules pour MODFLOW.....146
Figure C.9 : Choix des unités 147
Figure C.10 : Choix pour initialiser une période de temps 147
Figure C.11 : Définition de la période de stress 148
Figure C.12 : Passage des solids à MODFLOW 150

Figure C.13 : Propriétés spécifiques des matériaux 151
Figure C.14 : Paramètres pour utiliser les valeurs des matériaux dans MODFLOW 152
Figure C.15 : Délimitation des couches pour l'élévation. 154
Figure C.16 : Options de recharge 156
Figure C.17 : Propriétés des lacs 158
Figure C.18 : Délimitation des rivières en suivant un DXF 159
Figure C.19 : Valeurs des rivières 160
Figure C.20 : Caractéristiques des points d'observation 162
Figure C.21 : Points d'observation sur le terrain 163
Figure C.22 : Caractérisations d'itération de la simulation 165
Figure C.23 : Paramètres de la sauvegarde d'informations d'une simulation 166

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.2 : Options de simulation d'HYDROTEL 12

Tableau 2.3 : Liste des différents progiciels contenues dans MODFLOW... 25

Tableau 2.4 : Résumé des logiciels utilisant MODFLOW : PMWIN et GMS ..29

Tableau 3.1 : L'occupation des sols sur l'ensemble du bassin versant Chaudière 34

Tableau 5.1 : Échelle des temps géologiques.....48

Tableau 5.3 : Résumé de la qualité de l'eau sur la rivière Famine 52

Tableau 6.3 : Valeurs moyennes du taux d'infiltration sur l'ensemble des 183 UHRH sur le bassin versant de la Famine et des précipitations à la station Saint-Georges 61

Tableau 7.4 : Niveaux piézométriques des 68 points de contrôle 74

Tableau 8.1 : Résultats de l'analyse de sensibilité 82

Tableau 8.2 : Valeurs fournies au modèle après calage et analyse de sensibilité 86

Tableau 8.3. : Données du débit de base (MODFLOW et HYDROTEL), de la lame d'eau et du débit en rivière à l'exutoire 89

Tableau A.1 : FELLOW 115

Tableau A.2 : MODFLOW 116

Tableau A.3 : SUTRA 117

Tableau A.4 : SWIFT 118

Tableau B.1 : Coefficient d'emmagasinement : 0,05 123

Tableau B.2 : Coefficient d'emmagasinement : 0,005 124

Tableau B.3 : Coefficient d'emmagasinement : 0,0005 125

Tableau B.4 : Coefficient d'emmagasinement : 0,00005 126

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1 : L'équation de base du bilan hydrique 6

Équation 2 : L'équation du bilan hydrique isolant la recharge 7

Équation 3 : L'équation du bilan vertical.....17

Équation 4 et 5: Les écoulements verticaux q1, 2 et q2, 3 17

Équation 6 : L'équation d'écoulement hypodermique Q2 18

Équation 7 : L'équation du débit de base provenant de la troisième Couche Q3 18

Équation 8 : L'équation de l'évaporation maximale du sol Em 18

Équation 9 : L'équation du coefficient de sécheresse Cs 19

Équation 10 : L'équation du contenu relatif en eau θ r, 1 19

Équation 11 : L'équation de l'évaporation sur sol dénudé E(c)..... 19

Équation 12 : L'équation pour calculer la charge au point i, j (hi,j) 24

Équation 13 : L'équation différentielle de l'écoulement 25

Équation 14 : L'équation représentant la somme des écoulements.....25

1.0 Introduction

Depuis plus d'un siècle, les hydrologues reconnaissent que l'eau de surface est étroitement reliée à l'eau souterraine. Cependant, la plupart des études portant sur leurs interactions sont menées par une seule discipline. Les recherches sont ainsi dirigées vers des buts non connexes et permettent difficilement d'utiliser à pleine capacité l'ensemble des ressources. Cette problématique est devenue plus qu'inquiétante avec la demande grandissante en eau potable, les conséquences incertaines provenant des changements climatiques et de la contamination des aquifères dans les milieux agricoles.

Nos compréhensions scientifique et sociologique ont récemment changé de direction; à tel point que les gouvernements n'administreront plus l'eau souterraine indépendamment de l'eau de surface. À l'instar du Règlement sur le captage des eaux souterraines (Gouvernement du Québec 2001), il est dit que tous les propriétaires de lieux de captage d'eau souterraine destinée à l'alimentation en eau potable devront établir, d'ici juin 2006, un plan de localisation de l'aire d'alimentation du lieu de captage. Il est donc primordial d'instaurer une procédure ainsi que des outils de modélisation performants pouvant répondre à cette demande.

1.1 Objectifs

Le présent projet porte sur la faisabilité d'utiliser le modèle hydrologique HYDROTEL (FORTIN *et al.* a,b 2001) pour évaluer la recharge et alimenter le modèle hydrogéologique MODFLOW (MACDONALD et HARBAUGH, 1998). L'intérêt de ce couplage réside dans le besoin de doter le système informatique de gestion intégrée de bassins versants, en l'occurrence GIBSI (VILLENEUVE *et al.* 1998) qui utilise déjà HYDROTEL, d'un modèle hydrogéologique. Cet ajout

permettra d'étendre l'application de GIBSI dans les bassins versants où les interactions eau de surface – eaux souterraines sont importantes.

Plus précisément, le projet a pour but d'analyser la possibilité d'utiliser les données de sortie d'un modèle hydrologique en tant que données d'entrée d'un modèle hydrogéologique. Ceci permettrait une économie substantielle au niveau des coûts et du temps normalement considérables lors de l'implantation usuelle d'un tel modèle. Profiter d'une panoplie de données déjà traitées (images de télédétection, caractérisation des unités hydrologiques relativement homogène, caractérisation du réseau hydrique, bilan hydrique, etc.) permettrait d'implanter une procédure simplifiée pour faciliter l'accessibilité à cet outil de gestion tout en rejoignant un bassin plus large d'utilisateurs.

1.2 Contenu de ce mémoire

Ce mémoire de maîtrise présente :

- Une revue de littérature sur les types de modèles (hydrologiques et hydrogéologiques) utilisés ainsi que sur la détermination de la recharge souterraine.
- Une méthode comprenant la localisation du territoire à l'étude et la caractérisation du sous-sol (géologie). Une description des données utilisées.
- La conceptualisation du modèle hydrogéologique (avec l'aide d'un logiciel) par un modèle mathématique hydrogéologique.
- Une analyse de sensibilité, les étapes de calage et les résultats des simulations.
- La conclusion des activités de recherche et des recommandations pour des travaux futurs.

2.0 Revue de littérature

En premier lieu, cette revue de littérature apporte des précisions sur les différentes façons d'évaluer la recharge souterraine. Par la suite, une brève description des principes régissant la modélisation hydrologique ainsi qu'une description détaillée du modèle HYDROTEL (FORTIN *et al.*, a,b 2001) sont présentées. Des explications sur la modélisation hydrogéologique ainsi qu'une description des différents modèles hydrogéologiques déjà existants sont exposées. Dernièrement, une description des principes de base des mécanismes d'interaction entre l'eau de surface et l'eau souterraine est présentée.

2.1 Techniques pour quantifier la recharge souterraine

Il existe plusieurs techniques pour identifier la recharge, toutefois les points importants sont les échelles de temps et d'espace. En effet, l'évaluation des ressources en eau requiert des informations à des échelles spatiales étendues et sur des durées de plus d'une dizaine d'années. Les techniques s'appuyant sur des données concernant les eaux de surface et de la zone non saturée fournissent des estimations de recharge potentielle, tandis que celles basées sur les données des eaux souterraines donnent généralement des estimations de la recharge réelle. C'est pour accroître la validité des estimations que plusieurs techniques sont confrontées.

2.1.1 Terminologie

Selon LERNER *et al.* (1990), les principaux mécanismes de recharge souterraine se conceptualisent de trois façons :

- *Recharge directe* : l'eau qui s'infiltre dans l'aquifère soit par l'excédent de l'humidité du sol ou par percolation verticale, et ce à travers la zone vadose.

- *Recharge indirecte* : l'eau qui s'infiltre jusqu'au niveau hydrostatique par percolation à travers la zone non saturée.
- *Recharge localisée* : Forme intermédiaire de recharge souterraine résultant de l'eau qui s'infiltre de façon horizontale à la surface en l'absence de canal défini.

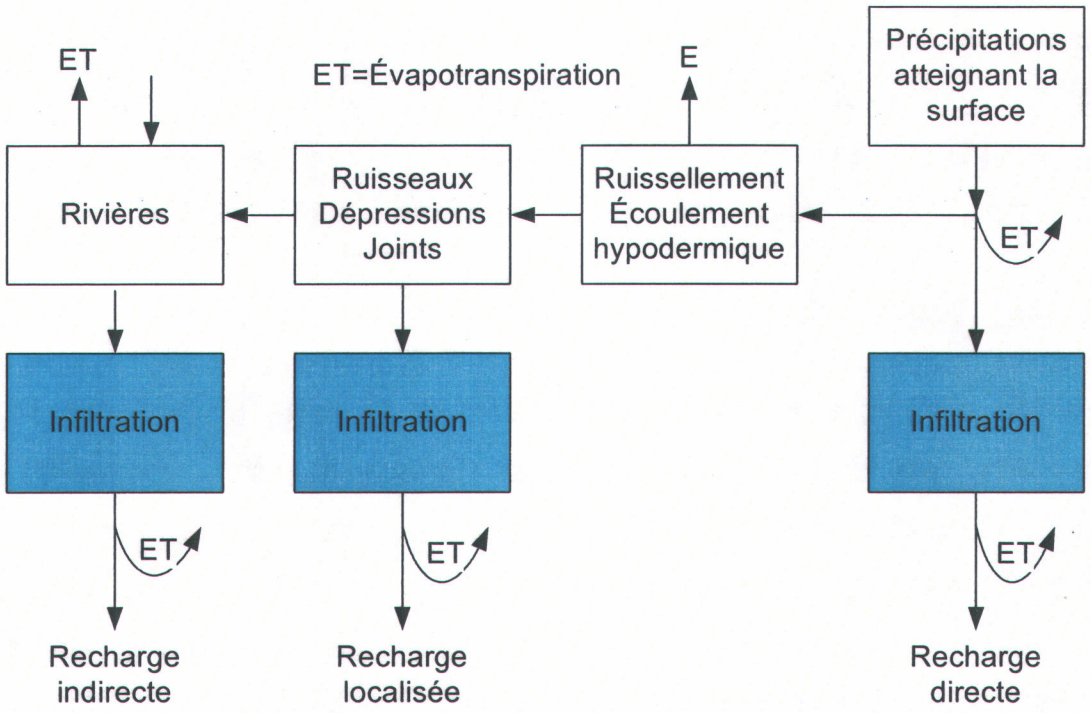


Figure 2.1 : Les différents mécanismes de recharges selon LERNER (1997)

La figure 2.1 provenant de LERNER (1997) est une expression simplifiée des mécanismes de recharge. La plupart du temps, une combinaison des différents mécanismes s'impose dans une seule situation par percolation selon un ou plusieurs procédés tels que : (1) la percolation diffuse; (2) l'écoulement par macro-pores (fentes de retrait, fissures, fentes venant de racines) ou (3) l'écoulement préférentiel causé par la différenciation des caractéristiques physiques d'un sol.

2.1.2 Les informations de base pour estimer la recharge

La première étape dans l'étude d'estimation de la recharge sur un bassin versant est d'entreprendre une collecte de données de terrain qui ont un certain potentiel de contrôle sur la recharge. Ces données sont celles du climat, de l'hydrologie, de la géomorphologie et de la géologie. Les données servent principalement à construire un modèle conceptuel qui, par la suite, est en mesure de décrire les mécanismes de la recharge et surtout d'estimer le taux de recharge.

Les données météorologiques et les paramètres hydrauliques d'un sol peuvent être de très bons estimateurs du taux de recharges initiales. Si des données hydrologiques sont disponibles, il faut prendre compte du débit en rivière (pour évaluer le gain dans les sections de rivière) et de la hauteur piézométrique (pour évaluer l'épaisseur de la zone non saturée).

Les variations de la géomorphologie peuvent aussi avoir un impact sur la recharge par les différences de topographie, de végétation et de type de sol. Dans les régions humides, la recharge se situe dans les aires de hautes altitudes du bassin et la résurgence, au contraire, dans les aires de basses altitudes telles les canaux et les ruisseaux. Avec l'aide de modèles numériques d'altitude et de systèmes d'information géographique, il est simple d'évaluer la pente et ainsi ériger un système de drainage bien précis.

L'impact de l'évapotranspiration provenant du couvert végétal est un élément primordial dans l'estimation de la recharge. La recharge est souvent importante dans les endroits où la végétation est inexistante et varie de façon quantitative selon le type de végétation lorsque celle-ci est présente.

Les parcelles de terre où l'irrigation est pratiquée doivent être identifiées, car l'eau redistribuée artificiellement change grandement le taux de recharge. Il est aussi important d'identifier les différents types de sols et leurs caractéristiques

comme la perméabilité car la granulométrie et la compaction des grains pondèrent aussi la recharge.

La géologie régionale permet aussi de pouvoir caractériser certaines parties des terrains pouvant influencer la recharge. Par exemple, certains amas de dépôts quaternaires situés au pied d'une montagne peuvent faire toute une différence dans le taux de recharge.

2.1.3 Les différentes techniques pour estimer la recharge

La méthode du bilan hydrique

La méthode la plus utilisée pour estimer la recharge est probablement le bilan hydrique. Le bilan hydrique peut être décortiqué en plusieurs sous-éléments mais l'équation de base (1) sur l'ensemble d'un bassin versant peut s'écrire comme suit :

$$\Delta S = P - ET - Q^{GW}_{out} + Q^{GW}_{in} + I - R - Q \quad (1)$$

ΔS = Taux de changement de l'emmagasinement
P = Précipitation incluant l'irrigation
ET = L'évapotranspiration
Q^{GW}_{out} = Écoulement de l'eau souterraine / extérieur du bassin
Q^{GW}_{in} = Écoulement de l'eau souterraine / intérieur du bassin
I = Infiltration
R = Ruissellement de surface et hypodermique, Résurgence
Q = Écoulement en rivière

L'équation (2) est une autre façon de formuler ce bilan hydrique en isolant le terme de recharge. Cette équation fait seulement état que toute l'eau qui arrive à surface de saturation s'écoule par écoulement souterrain, par résurgence, par évapotranspiration ou bien est retenue par emmagasinement.

$$\Delta S^{Gw} = I + Q^{Gw}_{in} - Q^{Gw}_{out} - Q^{Bf} - ET \quad (2)$$

ΔS^{Gw} = Taux de changement de l'emmagasinement de l'eau souterraine

I = Infiltration

Q^{Bf} = Écoulement provenant du débit de base ou de la résurgence

La méthode la plus commune pour estimer la recharge par bilan hydrique est la méthode indirecte ou l'approche « résiduelle ». Toutes les variables faisant partie du bilan, excepté R, sont mesurées ou estimées et R représente la somme. L'avantage principal de cette méthode est la flexibilité dans les ordres de grandeur de temps et d'espace. Les données variables peuvent provenir d'un lysimètre (échelle de résolution au centimètre et à la seconde) ou d'une analyse de changement climatique (échelle de résolution au kilomètre et à la décennie). La seule limitation de la méthode résiduelle est l'incertitude dans la prise de mesure et l'estimation des paramètres pris en considération. Cette limitation peut devenir critique lorsque l'amplitude du taux de recharge est faible comparativement aux autres paramètres tels que l'évapotranspiration par exemple.

La méthode par l'étude des eaux de surface

La méthode basée sur l'étude hydrologique (des eaux de surface) peut être utilisée lorsqu'il est question d'estimer la recharge. Les régions humides se caractérisent généralement par la création d'aquifères superficiels provenant de l'eau souterraine qui se décharge habituellement dans les lacs et les rivières. L'inverse est observable dans les régions arides et semi-arides. Il est donc possible d'estimer la recharge en utilisant les données d'eau de surface en additionnant ou soustrayant les données des aquifères superficiels. Plusieurs autres techniques sont utilisées pour parvenir à l'estimation de la recharge telles que :

- Techniques physiques
    - Budget hydrique de chenal
        - La perte ou le gain de l'eau de surface peut être estimé en utilisant le budget hydrique de chenal basé sur les données de débits en rivière (LERNER *et al.* 1990).
    - Jaugeur d'infiltration
        - Les jaugeurs d'infiltration sont utilisés pour déterminer la différence de volume dans le réservoir d'un lac ou d'une rivière dans un lapse de temps connu.
    - Séparation de l'hydrogramme
        - La recharge d'eau souterraine peut être estimée en séparant l'écoulement de base de l'hydrogramme. Cette technique se base sur le bilan hydrique (équation 2).
    - Par traceurs
        - La chaleur dans un cours d'eau peut être utilisée pour fournir des informations sur la vélocité et pour estimer l'infiltration.
        - Les isotopes stables de l'oxygène et l'hydrogène sont utilisés pour identifier la recharge d'eau souterraine des lacs et des rivières.
    - Modèle numérique
        - Les modèles numériques peuvent estimer le taux de recharge sur l'ensemble d'un bassin versant.

Cette revue des différentes techniques pour estimer la recharge souterraine rapporte que le moyen le plus simple et efficace est un combiné du bilan hydrique et du modèle numérique. En effet, il est possible d'estimer le taux de recharge sur un bassin versant sans avoir à installer des installations de prise de mesures et devoir entreprendre une longue campagne de relevés de données.

2.2 Modélisation hydrologique et description d'HYDROTEL

La modélisation hydrologique vise à conceptualiser les processus du cycle de l'eau et à formaliser ces derniers par des représentations mathématiques (VILLENEUVE *et al.* 2002). Celle-ci s'intéresse à la représentation des variations spatiales et temporelles des flux d'eau à l'échelle d'un bassin versant à l'aide de bilans de masse et de quantités de mouvement et d'énergie thermique. (VILLENEUVE *et al.* 1998b). Une classification selon la représentation mathématique des processus hydrologiques a séparé, selon FRANCHINI *et al.* (1996), les modèles hydrologiques en deux catégories distinctes, soit :

- Par des bilans de masse empiriques (basés sur des relations de vidange);
- Par des bilans mécanistiques de masse, de quantité de mouvement et d'énergie (basés sur des lois physiques de la mécanique classique).

Le but général d'une modélisation hydrologique est de contribuer à l'étude des bassins versants ainsi qu'à la solution et l'analyse de plusieurs problématiques de gestion de l'eau. Par exemple, on l'applique à la gestion des crues et des barrages ou encore à la prévision des apports pour des fins de sécurité civile et de production hydroélectrique.

Hydro-Québec et le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) du ministère de l'Environnement utilisent, à divers degrés, le modèle HYDROTEL (TURCOTTE *et al.* 2004). Dans un premier temps, il a été mis en place sur le bassin versant de la rivière Chaudière.

Dans ce projet, nous avons privilégié le modèle HYDROTEL car celui-ci fut développé par l'INRS et fait partie intégrante d'un système d'information de gestion intégrée de bassins versants, en l'occurrence GIBSI (VILLENEUVE *et al.* 1998b). Comme mentionné dans l'introduction, notre but est d'utiliser les données sortantes d'HYDROTEL pour les introduire comme données d'entrée à

un modèle hydrogéologique. C'est pour cette raison que seulement le modèle hydrologique HYDROTEL sera décrit dans cette revue de littérature même si nous sommes bien conscients que plusieurs autres modèles auraient pu être utilisés lors de cette exercice.

2.2.1 Description d'HYDROTEL

Le modèle HYDROTEL innove[2] en exploitant des bases de données[3] provenant de la télédétection et des systèmes d'information géographiques (SIG), facilitant ainsi l'acquisition de données météorologiques, d'affectations du sol, de caractéristiques géologiques et topographiques. Plus encore, HYDROTEL se sert d'une interface intuitive.

La préparation des données implique une connaissance complète du système de drainage, de la distribution et de l'affectation des sols ainsi que de la structure pédogéologique des différentes couches associées.

2.2.2 Système de drainage

Le logiciel PHYSITEL (TURCOTTE *et al.* 2001) à été conçu spécialement pour préparer les bases de données de la structure interne du système de drainage dont HYDROTEL a besoin pour faire ses simulations, et ce pour chaque bassin versant. PHYSITEL est compatible avec les logiciels commerciaux de SIG pour faciliter l'échange de données déjà existantes. Les modèles numériques d'altitude

[2] Par rapport aux modèles « Système Hydrologique Européen (SHE) (ABBOTT *et al.*, 1986 a,b) et TOPMODEL (BEVEN *et al.* 1979) ». Ces modèles n'ont pas été développés en utilisant les systèmes de la télédétection et les SIG.

[3] Il faut mentionner que les données provenant de la télédétection ne sont pas traitées par HYDROTEL mais bien par des logiciels vendus commercialement.

et du réseau peuvent être combinés pour améliorer l'exactitude de la représentation du système de drainage. Lorsque la structure interne du bassin versant est déterminée en s'assurant bien que les erreurs découlant des altitudes ou des pentes nulles aient été corrigées, la prochaine étape consiste à particulariser le réseau hydrographique. Pour de plus amples détails sur la description du calcul de l'hydrogramme géomorphologique unitaire veuillez vous référez à FORTIN *et al* (2001a). Finalement, les unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) du réseau peuvent être facilement identifiées. Il est prudent, en pratique, de revoir les résultats obtenus par les modèles de préparation des données lorsque le réseau de drainage est de type méandriforme sur un terrain plat pour bien s'assurer que la section d'écoulement suive une direction la plus réelle possible.

2.2.3 Affectation des sols et pédogéologie du milieu souterrain

Normalement, l'information utilisée en ce qui a trait à l'affectation des sols est obtenue à l'aide d'images à haute résolution provenant de la télédétection. Il faut définir au préalable chaque classe de sol par leurs attributs quantitatifs (indice foliaire, profondeur des racines, albédo) qui varient en fonction du temps. Généralement, les classes se subdivisent en trois catégories distinctes, soit : la forêt de conifères, la forêt de feuillus ainsi que les aires ouvertes. HYDROTEL, permettant de distinguer différents types de sols dans les sous-bassins versants ne permet toutefois pas de prendre en compte les couches souterraines dont nous connaissons l'incidence sur la pertinence d'un modèle hydrogéologique.

2.2.4 Caractéristiques générales

L'adoption d'une approche informatique modulaire facilite la modification des données à toutes les étapes de la caractérisation. Les options décrites au tableau

2.1 ont été choisies afin que le modèle puisse s'adapter à la plupart des bassins versants, tant que les données météorologiques et celles provenant de la télédétection et des SIG sont disponibles. HYDROTEL a la particularité de pouvoir estimer certains paramètres issus d'algorithmes dérivés de représentations physiques, lorsque cela est possible. Dans tous les cas, des paramètres de calage sont indispensables. Les simulations peuvent être fournies sur une base quotidienne ou selon des pas de temps sous-multiples de 24 heures. Des efforts sont réalisés pour permettre des simulations validées sur une base horaire.

Tableau 2.2 : Options de simulation d'HYDROTEL

1. Interpolation des précipitations	1.1. Polygones de Thiessen
	1.2. Interpolation à partir des trois stations les plus proches
2. Accumulation et fonte du couvert nival	2.1. Méthode mixte des degrés-jours et du bilan énergétique
3. Évapotranspiration	3.1. Thornthwaite
	3.2. Linacre
	3.3. Penman-Monteith
	3.4. Priestley-Taylor
	3.5. Hydro-Québec
4. Bilan hydrique vertical	4.1 CEQUEAU (modifié)
	4.2. BV3C
5. Débit des sous-bassins vers le réseau fluvial	5.1. Équation de l'onde cinématique
6. Alimentation du cours d'eau	6.1. Équation de l'onde cinématique
	6.2. Équation de l'onde diffusante

2.2.5 Interpolation des précipitations

En premier lieu, les variables météorologiques sont obtenues sur chaque UHRH avec une attention particulière aux gradients verticaux. Deux options sont disponibles pour interpoler les précipitations et les autres variables météorologiques observées. Premièrement, par la méthode des polygones de Thiessen, et deuxièmement, par la méthode d'interpolation des trois stations les plus proches. Il est à noter que la différenciation entre les précipitations liquides et solides est déterminée par la température de l'air ambiant.

2.2.6 Accumulation et fonte du couvert nival

La simulation de variations quotidiennes (épaisseur, équivalent en eau, densité moyenne, déficit thermique, contenu en eau, température) reliées au couvert nival se révèle difficile. La sélection d'une méthode simplifiée mettant en rapport les degrés-jours au bilan énergétique complet est la plus appropriée, surtout dans la mesure où il est probable que les utilisateurs d'HYDROTEL ne disposent que de données de température et de précipitations. Dans ce cas, il est suggéré d'utiliser l'équation de RILEY (1972) qui permet d'obtenir la fonte à la surface air-neige (mm/jr). Il est à noter que seulement trois classes d'affectation des sols sont considérées dans les simulations du couvert nival (conifères, feuillus et aires ouvertes).

2.2.7 Évapotranspiration potentielle

Pour déterminer l'évapotranspiration potentielle, HYDROTEL propose de choisir entre cinq équations[4] largement répandues et dont le choix se fait en fonction des données disponibles. L'évaporation potentielle peut être mesurée à partir des mesures directes sur les bacs d'évaporation en utilisant un coefficient d'évaporation. Les valeurs de ce coefficient sont tabulées pour différentes conditions climatiques et environnementales. Une autre méthode d'évaluation directe est l'utilisation de cases lysimétriques. Dans ce cas, le taux d'évaporation est déterminé par la mesure des pertes d'eau. Il est très difficile de choisir la meilleure méthode pour estimer l'évapotranspiration. D'une part, les équations existantes sont multiples et, d'autre part, les données climatiques ne sont pas toujours disponibles. Les méthodes mixtes (la méthode Penman et ses variantes) sont une combinaison des équations du transfert de masse et du bilan d'énergie. Elles sont considérées comme les plus fiables pour obtenir des données journalières d'évapotranspiration potentielle dans les conditions actuelles.

2.2.8 Bilan hydrique vertical

Deux options sont disponibles pour simuler l'évolution de l'humidité dans la colonne pédogéologique. La première option provient du modèle CEQUEAU (MORIN et PAQUET 1995), la deuxième option a été conçue spécialement pour atteindre les objectifs d'HYDROTEL en fonction de l'estimation des processus physiques par les moyens de la télédétection et de SIG. Celle-ci prend en compte l'infiltration et le ruissellement, sans considérer l'interception des végétaux. Cette décision d'exclure un sous-modèle d'interception fut prise dans l'optique où les

[4] THORNTHWAITE, LINACRE, PENMAN-MONTEITH, PRIESTLEY-TAYLOR, Hydro-Québec.

paramètres régissant l'algorithme étaient difficiles à estimer et, par le fait même, engendraient des réponses peu rigoureuses.

En raison de l'avancement technologique depuis la création initiale d'HYDROTEL, ses sous-modèles (CEQUEAU, BV3C) n'ont pas été conçus pour exploiter un pas de temps plus petit que 24 heures. Toutefois, la poursuite croissante des objectifs de qualité auprès des concepteurs nous amène maintenant à un pas de temps de trois heures (FORTIN *et al.* 2001 a,b) et (TURCOTTE *et al.* 2004) et des efforts sont soutenus pour obtenir un pas de temps horaire d'ici peu.

Le bilan hydrique vertical (représenté par CEQUEAU) sur la fraction terrestre du domaine affecté est simulé par deux réservoirs de sols en série. Ceux-ci correspondent respectivement, par rapport à la surface terrestre, à la simulation d'humidité dans la zone non saturée (couche de sol d'écoulement hypodermique) et à la simulation d'humidité dans la zone saturée (couche de sol du débit de base). À chaque pas de temps, les valeurs de précipitation ou de fonte sont séparées soit en écoulement de surface ou en infiltration, conformément à la fraction régionale de l'unité dite imperméable. Le niveau d'eau (H_s) dans le réservoir d'écoulement hypodermique monte selon un niveau d'infiltration et diminue selon un niveau d'évapotranspiration et d'exfiltration vers la couche de sol du débit de base lorsque H_s dépasse le seuil d'infiltration. Par ailleurs, lorsque H_s est plus grand que le seuil d'écoulement (souvent égal au seuil de percolation), le réservoir devient en quelque sorte une zone saturée et produit un ruissellement de surface sur l'aire entière du domaine simulé. En période d'étiage, le débit de base est proportionnel au niveau d'eau (H_n) dans le réservoir de la zone saturée. Ce niveau varie selon l'évapotranspiration et l'infiltration. Un pourcentage (entre 10 % et 20 %) de l'évapotranspiration est directement extrait du réservoir du débit de base. Il faut prendre en note que seulement un réservoir (du même type qu'en zone non saturée) est pris en considération pour simuler le bilan hydrique vertical des lacs et des plans d'eau.

La seconde option (BV3C), créée spécialement pour HYDROTEL, est définie par des variables qui représentent approximativement les macro-procédés étant reliés à l'infiltration et la redistribution de l'eau dans la zone non saturée correspondant à l'UHRH. Toutefois, même si les différents types de sol ainsi que leurs couches respectives sont classés par leurs caractéristiques hydrauliques propres, les équation utilisées par BV3C ne sont pas en mesure de décrire précisément le comportement de l'écoulement et de la retenue d'eau en trois dimensions dans les couches de sol.

Pour des fins de simulations, la colonne de sol se divise en trois couches. Celle de surface est relativement peu profonde (10-20 cm) et correspond à la couche affectée par l'évaporation et l'infiltration. La deuxième couche est plutôt associée à l'écoulement hypodermique, et la troisième couche au débit de base (voir figure 2.1). L'épaisseur et les caractéristiques hydrauliques des trois couches varient pour chaque territoire étudié mais restent constantes dans le temps.

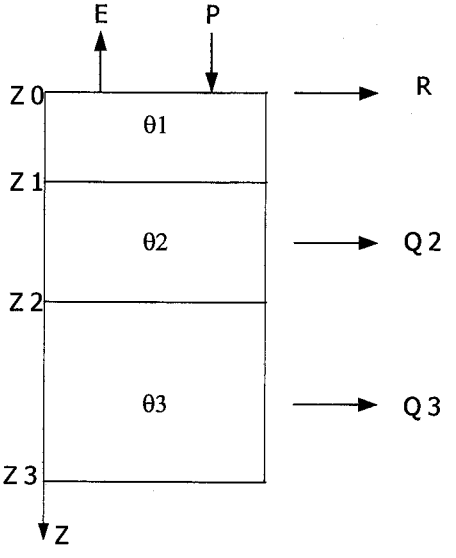


Figure 2.2 : Schéma décrivant le bilan vertical en trois couches du modèle HYDROTEL

$$Z_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = P - q_{1,2} - E - Tr_1 \quad (3)$$

$$(Z_2 - Z_1)\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = q_{1,2} - q_{2,3} - Tr_2 - Q_2$$

$$(Z_3 - Z_2)\frac{\partial \theta_3}{\partial t} = q_{2,3} - Tr_3 - Q_3$$

P = Infiltration provenant de la pluie ou de la fonte

$q_{i,j}$ = Écoulement vertical entre les couches i et j

E = Évaporation de la couche $i\left[L/T\right]$

Tr_i = Transpiration de la couche $i\left[L/T\right]$

Q_i = Écoulement horizontal de la couche $i\left[L^2/T\right]$

Z_i = Limite des couches i

θ_i = Contenu en eau de la couche i

Pour estimer les flux entre les couches de l'UHRH, la conductivité hydraulique K (θ_j) de chaque couche *j* doit être estimée comme une fonction de la valeur à saturation K_s, de la quantité d'eau contenue dans les couches *j* ainsi que la distribution de la dimension des vides, selon l'équation de Campbell. La conductivité hydraulique $K_{j,\,j+1}$ entre les couches j et j+1 est considérée comme possédant la valeur la plus grande de K (θ_j) et K (θ_{j+1}) selon MAHRT et PAN (1984). Le potentiel matriciel ψ (θ_j) est lui aussi dérivé de sa valeur à saturation ψ (θ_s), de la quantité d'eau contenue dans les couches (θ_j) (θ_s) ainsi que la distribution de la dimension des vides, selon CLAPP et HORNBERGER (1978). Les écoulements verticaux $q_{1,\,2}$ et $q_{2,\,3}$ [L/T] sont exprimés par les équations (3 et 4) :

$$q_{1,2} = K_{1,2}\left(2\frac{\Psi(\theta_2) - \Psi(\theta_1)}{Z_2} + 1\right) \quad (4)$$

$$q_{2,3} = K_{2,3}\left(2\frac{\Psi(\theta_3) - \Psi(\theta_2)}{Z_3 - Z_1} + 1\right) \quad (5)$$

L'écoulement hypodermique peut être associé à plusieurs procédés hydrologiques selon BEVEN (1989). Exploitant cette démarche, l'écoulement hypodermique Q_2 (équation 6) de la deuxième couche devient significatif seulement si la teneur en eau dans cette couche se situe entre la capacité au champ et la saturation. Alors Q_2 [L^2/T] est estimé comme une fonction de la pente S_n de l'UHRH, de l'épaisseur de la couche (Z_2 - Z_1) et de la conductivité hydraulique de cette même couche :

$$Q_2 = K(\theta_2)\sin\left[\arctan(S_n)\right](Z_2 - Z_1) \tag{6}$$

Si l'on exprime Q_2 par profondeur unitaire perpendiculaire à l'écoulement on obtient l'écoulement horizontal de l'équation 3, q_2. Physiquement, q_2 correspond au débit horizontal par surface unitaire perpendiculaire à l'écoulement. Finalement, le débit de base provenant de la troisième couche Q_3 (équation 7) [L^2/T] est fonction de la teneur en eau (θ_3), de l'épaisseur (Z_3 - Z_2) de cette couche et du coefficient de récession K_r qui peut être établi selon le débit mesuré.

$$Q_3 = K_r(Z_3 - Z_2)\theta_3 \tag{7}$$

Si l'on exprime Q_3 par profondeur unitaire perpendiculaire à l'écoulement on obtient l'écoulement horizontal de l'équation 3, q_3 L'évaporation maximale du sol E_m [L/T] est évaluée par l'équation 8 et assume que les conditions d'humidité du sol soient au moins équivalentes aux conditions de capacité au champ.

$$E_m(c) = PET\exp^{-D\cdot LAI(c)} \tag{8}$$

Où LAI représente l'indice de surface foliaire pour la classe d'affectation du sol utilisé c, et D est le coefficient d'extinction d'absorption de la radiation solaire par la végétation. Pour la première couche, un coefficient de sécheresse C_s

(équation 10) est calculé comme étant fonction du contenu relatif en eau $\theta_{r,1}$, (équation 9) et un deuxième coefficient $\alpha(s)$ dépend de la classification du sol.

$$\theta_{r,1} = \frac{\theta_1 - \theta_{wp}(s)}{\theta_{fc} - \theta_{wp}(s)} \tag{9}$$

$$C_s = \frac{1 - \exp^{-\alpha(s)\theta_{r,1}}}{1 - 2 \bullet \exp^{-2\alpha(s)} + \exp^{-\alpha(s)\theta_{r,1}}} \tag{10}$$

Où θ_{fc} représente la quantité d'eau à la capacité au champ, θ_{wp} est la quantité d'eau au point de flétrissement et S est l'indice du type de sol. L'équation (11) de l'évaporation sur sol dénudé est donc :

$$E(c) = C_s E_m(c) \tag{11}$$

2.2.9 Bilan hydrique

Ce bilan est habituellement réalisé à partir d'unités hydrologiques relativement homogènes. Ces unités (UHRH) sont en quelque sorte des mini-sous-bassins versants qui constituent un réseau détaillé obtenu à partir de données résultant des modèles numériques d'altitude.

2.2.10 Conclusion à propos du modèle hydrologique HYDROTEL

Ce modèle hydrologique distribué, compatible avec la télédétection ainsi que les SIG, provient d'algorithmes empiriques ou dérivés en grande partie des processus physiques. Une approche modulaire fournit à l'usager une latitude d'actions en ce qui a trait aux options disponibles à utiliser. Toutefois, HYDROTEL exige un nombre élevé de données d'entrée et une certaine expertise pour soutirer l'information provenant des images de télédétection. Étant donné que

HYDROTEL fait partie intégrante de GIBSI, notre défi sera de déchiffrer et d'analyser l'utilisation optimale des données de sortie de ce modèle, pour qu'ensuite celles-ci puissent être à leur tour les éléments essentiels d'entrée d'un modèle hydrogéologique.

2.3 Modélisation hydrogéologique

Par définition, un modèle hydrogéologique est une représentation mathématique des dispositifs essentiels d'un système hydrogéologique qui emploie les lois de la physique et des mathématiques. Il faut d'abord affirmer que les investigations et la modélisation hydrogéologiques sont dynamiques (évolutives dans le temps) et *a fortiori* une science inexacte (système complexe et absence de données observées). Autrement dit, la réponse d'un système aquifère est calculée par la solution numérique d'une équation d'écoulement souterrain.

La procédure de mise en œuvre d'une modélisation hydrogéologique complète doit suivre un certain cheminement; nous avons choisi d'utiliser celui proposé par ANDERSON et WOESSNER (1992) (voir figure 2.3). La prochaine étape fut l'analyse et le choix d'un modèle qui conviendrait le mieux à nos besoins parmi la synthèse des approches de modélisation hydrogéologique. Plusieurs modèles commerciaux d'approche conceptuelle simulent l'écoulement en zone saturée en régime permanent ou transitoire. Ils ont en commun un ensemble de paramètres pour décrire l'aquifère tels que : la délimitation de la surface, l'épaisseur des couches, les propriétés hydrauliques des unités géologiques (conductivité hydraulique et transmissivité), les charges hydrauliques des unités hydrogéologiques ainsi que la distribution et le taux de la recharge souterraine. De plus, chacun possède un ensemble de conditions d'entrée et de sortie et fournit des résultats de débits, de charges hydrauliques et de bilans hydriques.

La suite du chapitre relève en grande partie du rapport : *Études des processus hydrologiques et hydrogéologiques responsables des conditions d'étiage et de recharge dans les bassins versants du sud du Québec – Étude d'avant-projet.* (VILLENEUVE *et al.* 2002)

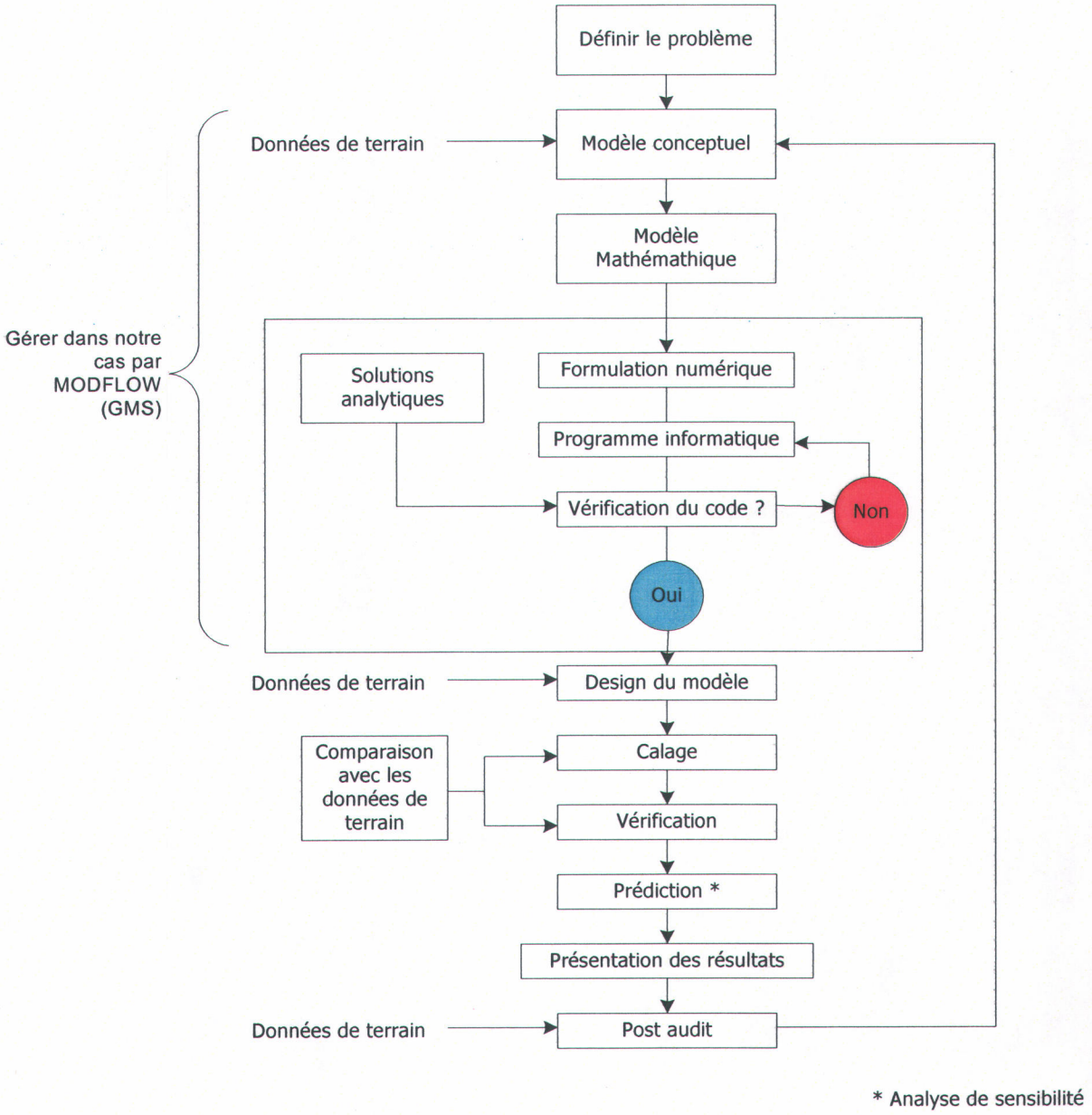


Figure 2.3 : Protocole des étapes d'application d'un modèle

2.3.1 Présentation des modèles hydrogéologiques potentiels

2.3.1.1 FEFLOW

FEFLOW (DIERSCH 2002) représente l'écoulement non saturé et saturé en 3-D par la méthode des éléments finis, et ce dans un milieu poreux ou fracturé. Utilisé plus particulièrement en Europe, le modèle semble robuste et offre l'option de changement de la densité des fluides et de transfert de chaleur. En tenant compte de la zone non saturée, il permet de simuler la recharge de l'aquifère à partir de la surface du sol. Il est possible d'utiliser le SIG ARC/info pour importer les données d'entrée et traiter les résultats.

2.3.1.2 MODFLOW

MODFLOW « *modular finite-difference ground water flow model* » a été développé par le *U.S. Geological Survey* (USGS). Ce programme simule les caractéristiques communes du système hydrogéologique (MACDONALD et HARBAUGH, 1988). Depuis sa première édition en 1984, trois versions améliorées ont vu le jour, dont la dernière en 2000 (MODFLOW-2000). Plusieurs progiciels ont été rajoutés au fur et à mesure que les recherches sur le système souterrain s'amélioraient.

Les capacités de simulation de MODFLOW

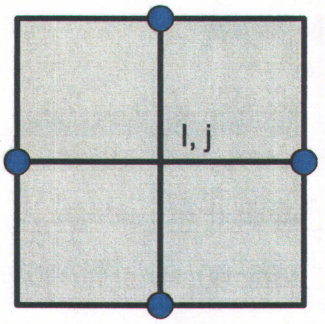
MODFLOW a été conçu pour simuler les systèmes aquifères où (1) existent des conditions en écoulement saturé, où (2) la loi de Darcy s'applique, où (3) la densité de l'eau souterraine est constante et où (4) les directions principales de la conductivité ou de la transmissivité horizontale ne varient pas dans le système. Un système aquifère peut contenir toutefois d'autres spécificités et pouvoir être simulé telles que :

- Sur un même système, les aquifères peuvent être non confinés et confinés et l'écoulement souterrain et l'emmagasinement peuvent varier.
- Des failles ou barrières peuvent affecter la résistance horizontale de l'écoulement souterrain.
- Le système peut supporter des unités confinées de matières très fines et d'interstrates.
- Un échange entre l'aquifère et les rivières, les drains, les couches de sol est possible.
- La recharge peut être calculée par rapport aux précipitations et l'irrigation.
- Les puits peuvent être injectés ou pompés à des taux spécifiques.

Les équations gouvernantes de MODFLOW

La méthode des différences finies est utilisée pour résoudre les équations d'écoulement sur l'ensemble du système à partir d'une moyenne des quatre points situés au milieu du cube. L'équation (11) en régime permanent avec aucune recharge aux limites s'écrit ainsi :

$$h_{i,j} = \frac{1}{4}(h_{i-1,j} + h_{i+1,j} + h_{i,j-1} + h_{i,j+1}) \quad (12)$$



Toutefois, dans MODFLOW, l'équation de base pour l'écoulement est remplacée par une équation différentielle (12) qui incorpore les principes de conservation de la masse :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)=S_s\frac{\partial h}{\partial t}-R \quad (13)$$

h(t=0) = gradient hydraulique
Kxx, Kyy, Kzz = Conductivités hydrauliques
(on suppose aucune anisotropie horizontale)
Ss = Emmagasinement spécifique
R = Débit entrant des sources et/ou puits de l'aquifère
W = Débit sortant des sources et/ou puits de l'aquifère

L'équation (14) est la somme des écoulements intrants et sortants d'une cellule à un même taux d'emmagasinement plus ou moins l'addition d'eau des sources ou drains du système.

$$\sum Q_i = S_s\frac{\Delta h}{\Delta t}\Delta V \quad (14)$$

Q_i = Somme de l'écoulement dans une cellule provenant des cellules adjacentes sur 6 faces
Δh = Variation de la charge
Δt = Variation du temps
ΔV = Volume de la cellule

Somme toute, l'écriture de l'ensemble des équations à chaque nœud peut s'exprimer sous forme matricielle : [A]{x} = {b}

Où A est le coefficient matriciel qui utilise les données spécifiques de l'utilisateur, x est le vecteur associé à la charge à chaque cellule et b est le vecteur de l'écoulement défini (emmagasinement et conditions aux limites de chaque cellule).

Programme à structure modulaire

MODFLOW est divisé en séries de progiciels et processus. Les tâches majeures sont organisées par les processus et les tâches plus spécifiques sont exécutées par les progiciels et chaque processus utilise un ou plusieurs progiciels. Cette structure modulaire permet d'intégrer des progiciels dans la suite logique des étapes d'avancement du modèle. Cette structure facilite aussi la préparation des données pour les essais de simulation. Les données sont lues par une sous-routine dans un même progiciel. Le tableau 2.3 dresse une liste des différents progiciels contenus dans MODFLOW.

Tableau 2.3 : liste des différents progiciels contenus dans MODFLOW.

Nom des progiciels	Description des progiciels
Basic (.BAS)*	Prend en charge les tâches comme la spécification des limites, la détermination des pas de temps, l'implantation des conditions initiales, le calcul du budget hydrique et l'impression des résultats.
Block-Centered Flow (.BCF)*	Ce module lit les informations telles que l'espacement entre la grille, le diagramme des strates, le type d'aquifère et les paramètres hydrauliques pour calculer les termes des équations (différences finies).
Well (.WEL)*	Permet l'ajout des effets sur l'injection ou l'extraction des puits.
Recharge (.RCH)*	Simule la recharge naturelle provenant des précipitations pour l'inclure au modèle selon l'équation des différences finies.
River (.RIV)*	Ce progiciel modélise l'interaction entre l'eau de surface et l'eau souterraine à partir des rivières.
.....	
Drain (.DRN)*	Similaire au progiciel *RIVER* mais il considère seulement les apports aux drains.
General-Head Boundaries (.GHB)*	Offre la possibilité de représenter l'écoulement à travers les diverses frontières du modèle.

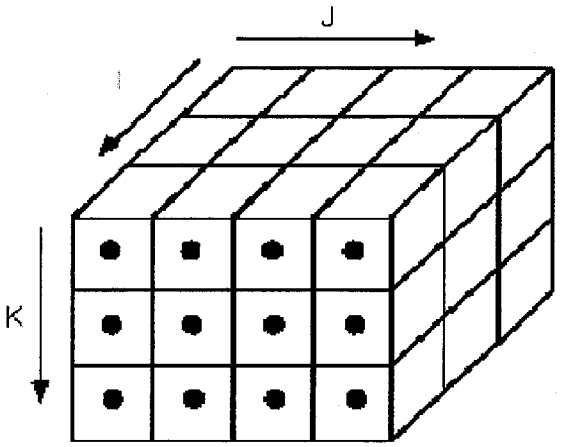


Figure 2.4 : Exemple d'une grille tridimensionnelle pour la simulation de l'écoulement souterrain

Les applications de MODFLOW

Pour utiliser la méthode des différences finies, l'aquifère doit être divisé selon une discrétisation spatiale, soit en un bloc rectangle appelé grille (figure 2.4). La grille est organisée selon des colonnes, rangées et couches; chaque cube est communément appelé cellule.

Chaque cellule doit être spécifiée par les propriétés de l'aquifère. Les rivières, puits, lacs, drains et toute autre entité comportant une entrée ou sortie d'eau avec l'aquifère doivent avoir leurs propres caractéristiques, par exemple : conductivité hydraulique horizontale, conductivité hydraulique verticale, transmissivité, porosité efficace, etc.)

MODFLOW utilise les données d'entrée pour construire et résoudre les équations de l'écoulement souterrain dans le système aquifère. La solution consiste à indiquer la charge de chaque cellule du système (sauf celles où l'utilisateur impose une charge constante) à chaque intervalle de temps. Ces charges calculées peuvent être ensuite comparées aux charges observées provenant des puisatiers ou puits pour déterminer le degré d'erreur du modèle. Le processus

d'ajustement des paramètres d'entrée pour réduire le degré d'erreur est référé au calage du modèle.

En plus de fournir la charge en chaque point, MODFLOW peut générer un budget hydrique global du système. En effet, une liste des débits d'eau entrants ou sortants provenant de l'aquifère est établie pour toutes les entités qui apportent ou enlèvent un écoulement au système.

Modélisation inverse

Habituellement, les paramètres d'entrée doivent être ajustés durant le calage du modèle utilisant une méthode d'essai et erreur. Toutefois, HILL (1992) ajouta un estimateur automatique de paramètres (MOFLOWP) dans le but d'atteindre plus facilement, le plus près possible, les données de terrain. Les paramètres pouvant être estimés sont : la transmissivité, la conductivité hydraulique, l'anisotropie verticale et horizontale, la conductance entre les aquifères, la conductance des rivières, des drains, l'évapotranspiration, le taux de pompage et la charge aux conditions limites. MODFLOWP utilise la méthode de Gauss-Newton ou bien la méthode de direction conjuguée pour arriver à obtenir des résultats s'approchant le mieux des données observées. Par la suite, un logiciel de traitement de données peut aisément calculer l'intervalle de confiance sur les charges et les débits prédits pour évaluer l'incertitude des prévisions.

Traçage de particules

Le programme de traçage de particules MODPATH est un progiciel pouvant estimer les lignes d'écoulement et le temps de transport dans le système souterrain. MODPATH peut être utilisé en régime permanent et transitoire pour évaluer le cheminement des contaminations provenant des aires de recharge, des puits, des drains, des rivières et toute autre source. Il est possible de placer des particules à des locations spécifiques et ensuite pouvoir suivre leur trajectoire

sur une période spécifique. Un lancement de particules multiples peut être utilisé pour simuler des panaches de contamination.

Conclusion de MODFLOW

Somme toute, MODFLOW permet de simuler l'écoulement en régimes permanent et transitoire dans un système irrégulier par la méthode des différence finies. Il peut aussi prendre en compte les stress externes tels que : l'évapotranspiration, l'écoulement des puits et drains, la recharge régionale et l'écoulement à travers des lits de rivières. Les conductivités ou les transmissivités spécifiques hydrauliques pour n'importe quelle couche peuvent différer dans l'espace et être anisotropes. MODLOW est vraisemblablement le modèle le plus utilisé en Amérique du Nord et de très nombreuses applications sont rapportées dans la littérature. Le code source écrit en FORTRAN 77 et les manuels explicatifs font partie du domaine public. Plusieurs interfaces conviviales ont été élaborées et sont disponibles sur le marché. Le tableau 2.3 expose les attributs des logiciels PMWIN (Processing MODFLOW for Window) et GMS (Groundwater Modeling System). Il est à noter que plusieurs autres interfaces sont disponibles telles que : Groundwater vistas et Visual MODFLOW.

Tableau 2.4 : Résumé des logiciels utilisant MODFLOW : PMWIN et GMS

Nom du logiciel	Processing MODFLOW	Groundwater Modeling System
Abréviation	**PMWIN**	**GMS**
Coût approximatif	1 600 US$ (2004)	3 000 à 6 000 US$ selon les options (2004)
Développeur, support	Chiang & Kinzelbach	*US Dept. of Defense*, EMSI, Brigham *Young University*
Fournisseur	Développeur, SS, CV	SS, CV, EMSI
Possibilités insaturées	Non	Non
Simulation d'écoulement en milieu fracturé	Non	Non
Transport des contaminants en solution et traceur de particules	MT3D, MT3DMS, MOC3D, PMPath99	MT3D, ModPath, RT3DMOC3D, SEAM3D
Support (achat supplémentaire requis)		Speed2D, SEAM3D
Calage automatique	Avec Pest et UCODE	Limité
Présentation et comptabilité avec SURFER	Importer des grilles SURFER et des graphiques géoréférencés Exporter des fichiers SURFER, DXF, HPGL, BMP	Compatibilité avec les SIG Importer des projets entiers provenant d'ARC GIS (*shapefiles*) Importer et exporter des DXF
Amélioration télescopique de maille	Oui	Oui
Vue à même l'écran	Projection du modèle d'écoulement, du plan et de la coupe des traceurs de particules. Des animations et des vecteurs de vitesse	Vue en plan et en coupe, des niveaux de la charge hydraulique, des rabattements et des vecteurs de vitesse. Des animations dans le temps.
Analyse de sensibilité des paramètres	Non	Limitée
Développement en cours	Oui, pour incorporer MODBRANCH	Oui, pour ajouter des interfaces à MODFLOW, faire le calcul de matrices
Commentaires	Excellente conception des modèles, excellent support technique pour les outils d'édition et les calculs de matrice, mais aucune barre de défilement. Soutien de tous les composants récemment distribués pour MODFLOW.	Excellente façon de construire les bases de données pour les puisatiers. Bon modèle geostatistiques et bonne interaction avec les SIG. Puissante capacité dans le développement des modèles conceptuels de MODFLOW

2.3.1.3 SUTRA

SUTRA (SOUZA, 1987) est un modèle simulant l'écoulement en milieux poreux non saturé et saturé dans un univers bidimensionnel ayant la particularité que son code source fasse partie du domaine public (USGS). De la même façon que MODFLOW, ce modèle offre l'option de changer la densité des fluides lors des simulations, utilisant un SIG à interface conviviale (Argus ONE) et prenant en compte la zone non saturée. La représentation bidimensionnelle permet de simuler l'écoulement en coupe ou à l'échelle régionale lorsque l'écoulement est horizontal. Toutefois, il ne peut simuler l'écoulement vertical, qui est non négligeable, à proximité d'un cours d'eau drainant.

2.3.1.4 SWIFT

SWIFT (REEVES *et al.* 1986 a,b) fut développé pour simuler le transport d'éléments radioactifs dans les milieux fracturés. Ses applications se sont élargies et permettent maintenant de simuler l'écoulement en milieu saturé dans un milieu poreux, fracturé ou à double porosité, bidimensionnel ou tridimensionnel. L'acquisition pour ce genre de simulation demande des paramètres supplémentaires qui les rendent parfois complexes. L'écoulement en présence de densités variables peut être simulé.

2.4 Principes de base des mécanismes d'interaction entre l'eau de surface et l'eau souterraine

Selon SOPHOCLEOUS (2002), les interactions hydrologiques entre les eaux de surface et les eaux souterraines se font par l'écoulement latéral des eaux de surface à travers la partie du sol non saturée et par infiltration ou exfiltration de la partie saturée. Pour les zones fracturées, l'écoulement se fait plutôt par des canaux préférentiels. Lors d'événements météorologiques tels qu'une pluie ou la

fonte des neiges, l'écoulement de surface (événementiel, direct, rapide ou bien de tempête) se distingue de l'écoulement de base (considéré comme provenant de l'eau souterraine) (DINGMAN, 2002 et BEVEN, 1989).

À plus grande échelle, les échanges entre l'eau de surface et l'eau souterraine sont contrôlées par :

- La distribution et l'importance de la conductivité hydraulique.
- La relation entre les cours d'eau et le niveau de l'eau souterraine.
- La géométrie et la position du cours d'eau dans la plaine alluviale.

2.5 Conclusion

Après avoir évalué les façons d'estimer la recharge souterraine, nous en sommes arrivés à privilégier la méthode du bilan hydrique vertical sur trois couches (BV3C) par modélisation numérique à partir d'HYDROTEL. L'écoulement vertical provenant de la deuxième couche vers la troisième (q_{2-3}) sera considéré comme la recharge souterraine à incorporer au modèle hydrogéologique MODFLOW. Étant donné qu'HYDROTEL fût conçu par l'INRS-ETE et conceptualisé sur le bassin versant de la Chaudière, il nous semble intéressant d'utiliser des données déjà compilées et validées. Pour ce qui est du modèle hydrogéologique, notre choix s'arrête sur MODFLOW. Notre décision à été influencée par sa robustesse, sa flexibilité par les options des différents progiciels, son impressionnante revue de littérature et ses diverses interfaces conviviales.

3.0 Simulations d'HYDROTEL

Le modèle HYDROTEL est largement expliqué au chapitre 2.1. Ce chapitre expose les paramètres de simulation et les intrants. Pour un exemple d'application sur le bassin versant de la Chaudière (6 680 km^2), le lecteur doit consulter FORTIN *et al.* 2001a. Les simulations explicatives de ce chapitre proviennent de l'article. Toutefois, ceux utilisées dans ce projet ont été exécutées sur le sous-bassin versant de la Famine avec des données mises à jour.

Les sections suivantes reprennent les principaux éléments de cet article.

3.1 Préparation de la base de données pour accomplir les simulations

La rivière Chaudière se jette dans le fleuve St-Laurent près de la ville de Québec et s'étend jusqu'à la frontière canado-américaine. La pédologie varie entre des dépôts marins et de la tourbe pour la partie des Basses Terres du St Laurent et plutôt du till et des affleurements rocheux pour la partie se situant dans les Appalaches. L'occupation des sols a été déterminée avec l'aide d'une image satellite datant du 28 août 1995. Le tableau 5.1 indique le pourcentage d'occupation de chaque entité sur l'ensemble du bassin versant. Toutefois, la majorité du bassin est occupée par la forêt. Le modèle numérique d'altitude a une résolution de 100 mètres par 100 mètres

Tableau 3.1 : L'occupation des sols sur l'ensemble du bassin versant Chaudière

Classes d'utilisation des sols	Aires (%)
Routes et aires urbaines	3,6
Pâturage et luzerne	11,3
Céréales	3,8
Mais	0,3
Eau	1,7
Sols humides	2,2
Sol nu	2,1
Buissons	12,7
Forêt de feuillus	40,0
Forêt de conifères	22,3

3.2 Application courante du modèle

3.2.1 Données utilisées dans les simulations

Les données météorologiques proviennent de 30 stations (sensiblement distribuées). Les données ont ensuite été interpolées par la méthode des trois stations les plus proches. Les données du débit ont été relevées sur trois stations : celle de la rivière Chaudière couvrant 85 % de l'aire totale, celle de la Famine couvrant 7 % de l'aire totale et celle de la Beaurivage couvrant 8 % de l'aire totale. Pour ce qui est des stations prélevant la quantité de neige, elles se dénombrent à 8, et 7 d'entre elles se retrouvent dans des forêts de feuillus. C'est en utilisant l'approche de degrée-jour - budget-énergie qu'il a été possible d'estimer la quantité de neige accumulée. C'est seulement avec les données de température qu'il a été possible de calculer le potentiel d'évapotranspiration avec l'équation d'Hydro-Québec. Les données pédologiques furent utilisées pour déterminer le bilan vertical avec l'option BV3C. Finalement, l'écoulement de surface, subsurface et du cours d'eau principal vers l'exutoire du bassin versant a été simulé par l'équation de l'onde cinématique.

3.2.2 L'approche du calage et de la validation

Premièrement, le calage des paramètres a été fait en utilisant des débits d'eau simulés et observés pour les années hydrologiques (octobre à septembre) 1989-1990 et 1993-1994. En pratique, le calage des paramètres a été effectué en deux phases. Dans un premier temps, seulement les périodes d'été ont été utilisées éliminant le besoin de calibrer les paramètres d'accumulation et de fonte de neige. Lorsque cette étape fut terminée, le calage a été complété pour l'année entière. Les résultats donnent un groupe de paramètres optimisés qui sont identiques pour toutes les unités de simulation verticale sur l'ensemble du bassin. Toutefois, notons que cela n'implique pas que toutes ces unités soient identiques, car les caractéristiques hydrauliques de chaque unité dépendent de la pédologie, changeant d'une unité à l'autre.

Les années hydrologiques 1987-1988 et 1990-1991 furent utilisées pour effectuer la validation temporelle du calage. Le modèle a été ensuite mis à l'épreuve sur une période de dix ans, d'octobre 1984 à septembre 1993, pour vérifier son efficacité à long terme. Une validation spatio-temporelle du calage a aussi été effectuée sur les sous-bassins Famine et Beaurivage pour les périodes de calage et de validation. Pour compléter les tests, des données d'accumulation de neige furent comparées à l'équivalent en eau de la neige simulé par le modèle sur huit unités de simulation sur lesquelles se situent les stations mesurant les précipitations et les accumulations de neige.

Les résultats ont été utilisés pour comprendre les différences entre les débits mesurés et simulés et pour comprendre l'origine de ces différences. Une différence entre les débits durant la saison hivernale peut provenir du manque de stations ainsi que la séparation des données entre la neige et la pluie et du sous-modèle d'accumulation et de fonte de neige.

Dans cet exercice de calage, les images radars ont seulement été utilisées pour déterminer les utilisations des sols. Elles aurait aussi pu servir durant les simulations. Par exemple, l'utilisation des radars pourrait mettre à jour les bases de données des précipitations, d'humidité du sol ou bien d'équivalent en eau en utilisant les micro-ondes passives ou actives.

3.3 Les résultats

On peut observer à la figure 5.3 (de l'article) que les débits mesurés sont normalement simulés de façon satisfaisante. En se souvenant que le calage a été effectué en utilisant seulement des écoulements sur la Chaudière pour les années hydrologiques 1989-1990 et 1993-1994, tous les résultats des simulations devraient être considéré comme des vérifications.

Aucune tendance à long terme n'est observée pour les écoulements simulés sur la rivière Chaudière, comme on l'indique à la figure 5 de FORTIN et al, (2001b). En fait, la déviation maximale des écoulements mesurés cumulés est 2 % et la différence entre les écoulements cumulés mesurés et estimés est moins de ± 1 % pour 89 % des jours. Après dix ans, le total estimé est de 0,2 % au-dessus du total mesuré. Dans le cas de la rivière Beaurivage, les valeurs estimées ont une faible tendance à sous-estimer les valeurs mesurées. La sous-estimation maximale est de 4,5 %, mais est moins de 2 % dans 61 % des jours et moins de 3 % pour 82 % des jours.

Il arrive en période de crues que les écoulements simulés soient bien au-dessus des écoulements observés (voir figure 5.3.2), en particulier sur la rivière Beaurivage en avril 1990. Cette différence proviendrait qu'en début de saison hivernale une surévaluation de l'équivalent en eau est enregistrée à la station la plus près (St-Étienne en l'occurrence).

3.4 Discussion

Le Modèle HYDROTEL fut développé dans l'objectif de simuler les effets hydrologiques résultant des modifications d'un bassin versant. De plus, il fut conçu pour être un outil facilitant la compréhension des procédés hydrologiques. Essentiellement, il devait être aussi compatible avec les systèmes de télédétection ainsi que les données provenant des SIG.

Enfin, HYDROTEL offre plus d'une option de simulation pour chaque sub-procédé sur un bassin versant; de l'aire de distribution des précipitations au débit à l'exutoire.

4.0 Gestion de l'eau souterraine

Le but premier de cette étude vise éventuellement à greffer un modèle hydrogéologique à GIBSI. GIBSI est développé au sein de l'INRS-ETE (VILLENEUVE *et al.* 1998b) et modélise les principaux processus physico-chimiques affectant l'évolution quantitative et qualitative des eaux de surface d'un bassin versant. Il inclut un système de gestion, de traitement et de visualisation des données. Cela permet de tester l'effet de différents scénarios de gestion du territoire, et notamment des modifications d'occupation du sol, sur les rendements, les conditions hydrologiques et la qualité de l'eau en rivière. GIBSI a déjà permis de mener des études prospectives sur l'impact de coupes forestières sur le régime hydrologique (LAVIGNE *et al.* 2004), l'impact de l'implantation de stations de traitement des eaux usées sur la qualité de l'eau (MAILHOT *et al.* 2002) et la caractérisation d'objectifs environnementaux de rejet de sources ponctuelle et diffuse (ROUSSEAU *et al.* 2002). Les récents développements concernent notamment l'intégration d'un module de calcul des ratios avantage/coût des scénarios de gestion agricole (SALVANO *et al.* 2004). GIBSI est implanté sur le bassin versant de la rivière Chaudière, qui occupe une superficie de 6 682 km², dont 63 % sont en forêt, 17 % en culture ou pâturage, 15 % en friche, 3 % en territoire urbain et 2 % en eau (VILLENEUVE *et al.* 1998a).

4.1 Virage de la gestion de l'eau souterraine au Québec

L'esprit de gestion par bassin versant, qui se base sur une bonne connaissance des phénomènes naturels et anthropiques, permet de mieux comprendre et d'expliquer les problèmes relatifs à la quantité ou à la qualité de l`eau. Cette approche repose sur la complicité de l'ensemble des acteurs de l'eau concernés : municipalités ou MRC, groupes de citoyens, usagers, ministères et organismes du

gouvernement. Après concertation lors du Symposium (Gouvernement du Québec, 1997) et de la consultation des audiences publiques (BAPE, 2000), les actions et engagements par le gouvernement sont maintenant posés dans l'optique d'une perspective de développement durable. En effet, l'orientation première de la nouvelle Politique nationale de l'eau au Québec (MENV 2002) est de réformer la gouvernance de l'eau en mettant en œuvre progressivement la gestion intégrée par bassin versant et en soutenant financièrement et techniquement la mise en place de 33 organismes de bassin.

4.2 Problématique de gestion de l'eau souterraine avec GIBSI

GIBSI, au Québec, comble en grande partie la gestion de la ressource en eau par bassin versant. Toutefois, l'absence d'un sous-modèle hydrogéologique devient contraignant lorsque GIBSI veut exporter sa technologie dans les régions où la composante eau souterraine est importante. Voyant que la gestion de l'eau par bassin versant est si différente d'un pays à l'autre, il nous semble important d'assembler tous les moyens susceptibles d'être pertinents afin d'intégrer un module comblant les besoins de chacun. GIBSI devrait permettre aux futurs utilisateurs de comprendre, de visualiser et de gérer l'évolution de la ressource en eau souterraine à une échelle régionale.

Quoi qu'il en soit, l'ajout d'un module hydrogéologique au sein de GIBSI reste un choix judicieux étant donné l'orientation de la *Politique nationale de l'eau* (MENV, 2002), ainsi que pour des raisons environnementales fondamentales. En effet, *la Politique nationale de l'eau* mentionne son désir de modifier les façons de faire sectorielles actuelles en une véritable gestion intégrée par bassin versant. Ce changement d'optique par les gouvernements est d'autant plus nécessaire car, en ce qui a trait seulement au domaine souterrain, l'absence de mesures préventives, l'aménagement et la localisation inadéquats des puits et l'ignorance des caractéristiques des nappes ont été à l'origine de nombreux cas de pollutions

ponctuelle ou diffuse des eaux souterraines ces dernières décennies. Depuis quelques années, les gouvernements du Québec et du Canada font force commune pour se donner les moyens nécessaires pour comprendre les aquifères clefs pour ainsi mieux les gérer. Toutefois, cette mission devra aussi être entreprise par tous les organismes de bassin du Québec pour s'assurer de bien connaître la ressource et pouvoir ainsi garantir une certaine sécurité civile en cas d'incident mineur ou majeur.

4.3 Objectifs futurs

En connaissant bien la ressource eau souterraine d'un bassin versant et ses interactions mécaniques avec son environnement, il est convenable d'utiliser des modules extérieurs à GIBSI, ceux-ci ayant la capacité de simuler les réactions chimiques et physiques de l'eau dans un milieu poreux et souterrain. Somme toute, la mise en place d'un module hydrogéologique permet un suivi de la qualité et la quantité de la ressource. Dans une perspective plus approfondie de la connaissance et de la prévision à long terme du milieu souterrain, il est pensable, par l'ajout de quelques paramètres, d'impliquer d'autres logiciels pour appliquer une modélisation encore plus complète.

5.0 Description de la zone à l'étude

Dans ce chapitre, nous avons voulu apporter certaines précisions pour mettre en contexte les lecteurs tant dans la description des lieux à l'étude qu'à la géologie environnante. La géologie est décrite selon les différentes formations, que ce soit la géologie de surface ou souterraine. De plus, une brève description de la qualité de l'eau sur l'ensemble du bassin est présentée en fin de section.

5.1 Localisation et caractéristiques du bassin versant de la Famine

La création du modèle et les simulations sont exécutées sur le bassin versant de la rivière Famine (728 km^2) situé environ au centre est du bassin versant de la rivière Chaudière (6 682 km^2), tel qu'illustré à la figure 5.1.

Les régions municipales correspondant au bassin de la rivière Famine correspondent à : Saint-Georges, St-Prosper-de-Dorchester, Sainte-Aurélie et Saint-Zacharie. Le centre du bassin se trouve à environ 80 km au sud-est de la ville de Québec et est limité par les longitudes 70° 14' 56" O et 70° 42' 11" O et par les latitudes 46° 06' 18" N et 46° 27' 04" N. Il correspond aux feuillets SNRC 21L/01, 21L/02, 21L/07, 21L/08 du découpage à l'échelle 1: 50 000.

Le bassin de la Famine à une élévation moyenne de 370 m, variant de 180 m à 550 m, 30 % de la superficie totale est occupé par des feuillus et 41 % par une forêt de conifères. La moyenne des précipitations annuelles enregistrée depuis 31 ans est de 1 177 mm, variant de 918 mm à 1 528 mm (ROUSSEAU *et al.* 2000).

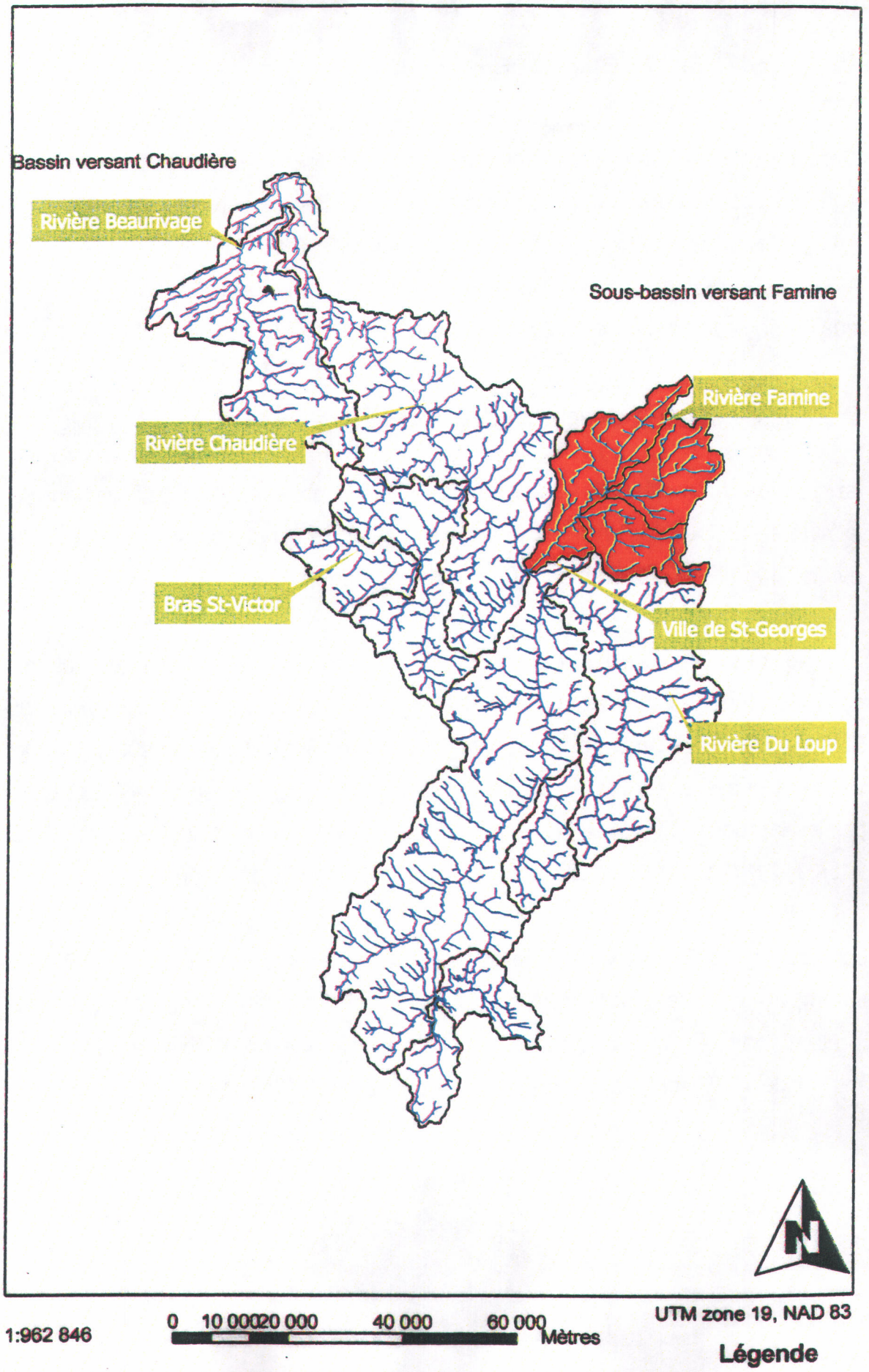


Figure 5.1: Localisation du bassin versant de la Famine

5.2 Géologie

La géologie du socle rocheux a été cartographiée par COUSINEAU *et al.* (1983) et COUSINEAU (1990) alors que SLIVITZKY et ST-JULIEN (1987) ont produit une synthèse géologique des Appalaches de l'Estrie-Bauce. Dans son contexte géologique, la rivière Famine est constituée de roches sédimentaires et volcaniques d'âge cambrien inférieur à ordovicien (voir tableau 5.1). Du point de vue tectonique, elle fait partie de la province structurale des Appalaches où les roches ont été successivement affectées par l'orogenèse taconique et acadienne. Celles-ci furent donc métamorphisées au cours du paléozoïque inférieur et moyen. Les dépôts quaternaires furent caractérisés par LASALLE *et al.* (1976), et se composent en grande partie du till de Lenoxville et des dépôts fluvioglaciaires de contact de glace.

5.2.1 Géologie du socle rocheux

La figure 5.2 décrit la géologie du socle rocheux pour l'ensemble du bassin versant de la Famine appartenant à la province géologique des Appalaches.

La majeure partie du bassin, au sud de la rivière Famine, est formée de terrains siluro-dévoniens du groupe de Saint-Francis, de la formation de Compton. Dans cette région, la roche en place est considérée comme étant non différenciée et comprenant une alternance d'ardoise et de grès fin localement calcaire.

Au nord de la rivière Famine, des bandes (sud-ouest / nord–est) du groupe de Magog (ordovicien moyen) forment des vestiges du domaine océanique. Les formations de Saint-Victor, Beauceville, Etchemin et Frontière sont présentes sur la partie nord-est du bassin.

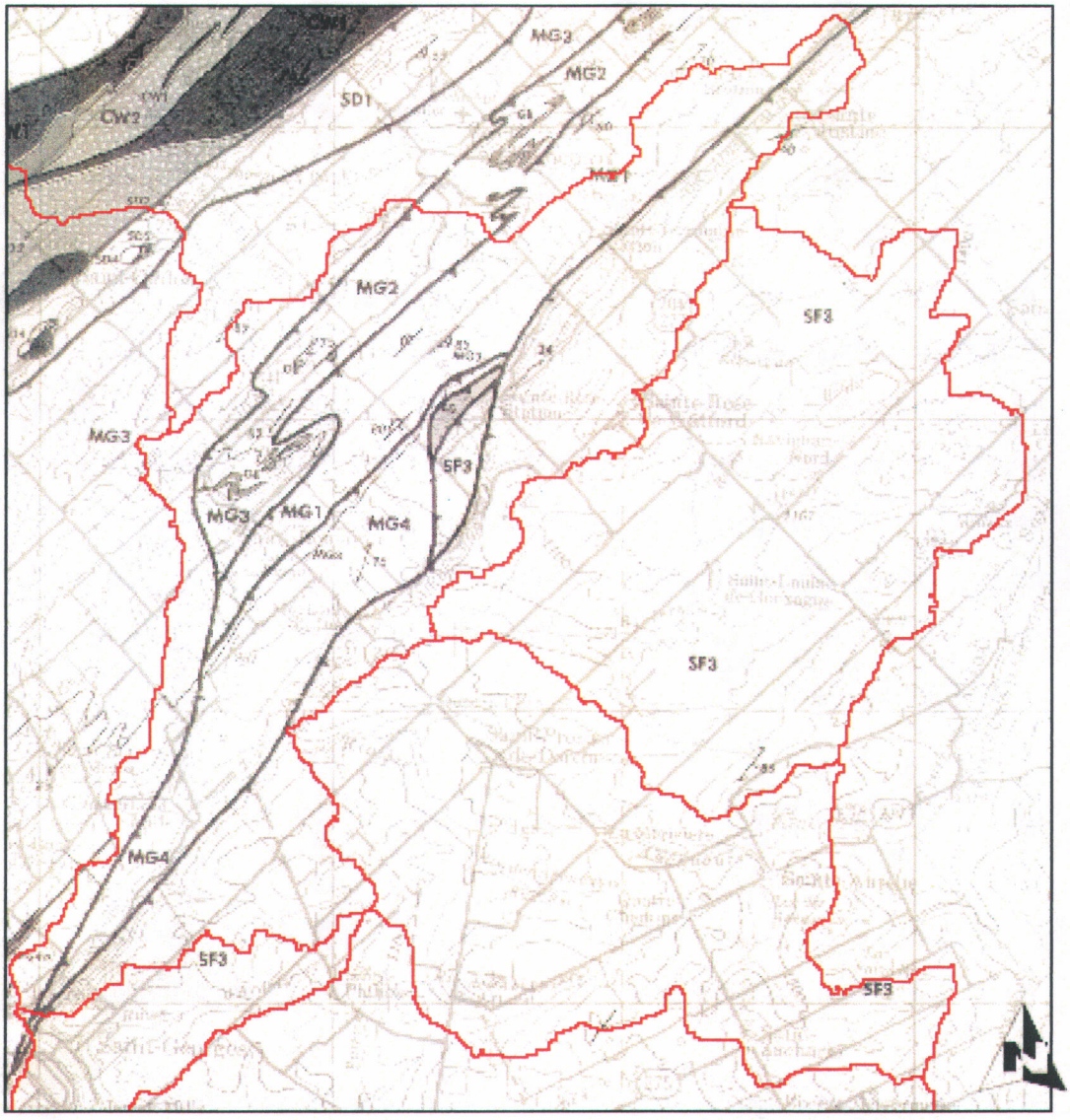


Figure 5.2 : Géologie du socle rocheux du bassin versant de la Famine

La formation de Saint-Victor est une séquence à turbidites formée de schiste ardoisier avec des interlits de grès feldspathique, de grès lithique, de tuf acide et de conglomérats.

La formation de Beauceville comprend des schistes ardoisiers graphitiques interstratifiés avec des arénites tufacées, des tufs acides et du chert. Les graptolites recueillis ont permis de dater cette formation à un âge ordovicien moyen.

La formation d'Etchemin est surtout constituée de volcaniclastites et de mudslates verts à mauves. On peut aussi y retrouver des horizons de siltstone cherteux.

La formation de frontière se compose d'une alternance de grès feldspathique vert et de mudslate vert. Des lits de grès d'une épaisseur de 10 cm à 2 m ont aussi été identifiés, toutefois aucun fossile n'a été trouvé dans cette formation.

Tableau 5.1 : Échelle des temps géologiques (les aires colorées représentent les ères et périodes correspondant aux événements affectant les roches et les dépôts meubles du territoire étudié)

Éon	Ère	Période	Âge absolu (Ma)	Événements significatifs
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire	1.6	Wisconsinien (80 à 10 Ka)
		Tertiaire	66.4	
	Mésozoïque	Crétacé	144	
		Jurassique	208	
		Trias	245	
	Paléozoïque	Permien	286	
		Carbonifère	360	
		Dévonien	408	Orogenèse acadienne
		Silurien	438	
		Ordovicien	505	Orogenèse taconique
		Cambrien	570	

5.2.2 Géologie de surface

La figure 5.3 : Carte des dépôts de surface du bassin Famine, se situe dans une pochette à la fin du mémoire étant donné sa grandeur. Elle présente les dépôts meubles sur le bassin versant de la Famine. Quatre cartes représentant les régions 21L01, 21L02, 21L07 et 21L08 (délimitation gouvernementale) ont été numérisées. Ces quatre cartes n'ont pas été faites au même moment, c'est pour cette raison qu'il y a une discordance entre les joints des cartes. (BLAIS et SHILTS 1992)

Lors du dernier épisode glaciaire majeur (le wisconsinien supérieur), lors de l'étape du pléistocène supérieur, une calotte glaciaire continentale (inlandsis laurentidien) s'est avancée dans la région des Appalaches en direction sud-est. Au maximum de la glaciation, il y a environ 18 500 ans, ces glaces ont atteint la côte américaine et l'épaisseur des dômes variait entre 3 200 m et 4 000 m. La surface fut probablement couverte de glace jusqu'à la période de déglaciation finale, il y a 10 000 ans. C'est pendant la phase d'englacement du continent que la matière profonde a été en quelque sorte expulsée vers les marges de l'inlandsis. Lors de cette avancée, des dépôts de type till (régional de Lennoxville) ont recouvert en majorité la surface.

Entre cette période du wisconsinien supérieur et celle de la déglaciation, les traces du glacier ont laissé des dépôts de contact de glace constitués de tills, de sables et de graviers. Par la suite, il y a environ 12 900 ans, une phase de stagnation laissa des dépôts fluvioglaciaires tels des sables et graviers constituant des eskers et des kames.

Le reste de l'histoire géologique peut se résumer à celle du relèvement isostatique et de l'abaissement relatif du niveau de la mer, certains auteurs établissant cette variation entre 70 et 80 m. Les conditions fluviatiles d'eau douce

et le système fluvial actuel se sont graduellement installés pendant les derniers 10 000 ans lors de l'holocène, laissant sur leur chemin des alluvions et des dépôts organiques. D'après plusieurs spécialistes de la période quaternaire, nous devrions considérer l'holocène non pas comme une subdivision du quaternaire mais comme une nouvelle division que l'on pourrait appeler « technogène » étant donné les changements technologiques qui font en sorte de mettre la planète terre dans une phase évolutive sans précédent qui se poursuivra au cours du prochain millénaire.

Till de Lennoxville

Ce till est le dépôt qui couvre la plus grande superficie dans la région. Mince sur les interfluves, il est beaucoup plus épais et présent dans les vallées, excédant 25 m à certains endroits. Sa couleur varie de gris clair à brun clair et il contient des clastes enrobés dans une matrice silto-sableuse. Ces fragments de roches sont surtout d'origine locale, mais on retrouve également des fragments de roches du plateau laurentien tels que des granites et des gneiss granitiques. Le till de Lennoxville est compact, fissile et est généralement oxydé en surface. Il repose sur le roc et son contenu en carbonate est variable d'un endroit à l'autre. Il renferme aussi de minces amas d'argile à varves grises et gris rougeâtre. Très peu utilisé comme source de granulats, il est plutôt utilisé comme matériel de remplissage en raison de sa compacité et la proportion élevée de silt et d'argile.

Dépôts fluvioglaciaires de contact de glace

Ces sédiments déposés par les eaux de fonte forment la principale source d'approvisionnement en sable et gravier de la région. Selon LASALLE *et al.* (1976), ces dépôts, stratifiés pour la plupart, sont caractérisés par des variations rapides de la granulométrie et par l'épaisseur très variable des stratifications dans

une même coupe ou même face d'exploitation. Les dépôts de contact de glace sont caractérisés par une granulométrie très grossière et par un tri hétérogène. Ils sont constitués de sables, de graviers, de cailloux et de till en proportions variables avec des écarts brusques dans la granulométrie. Parmi cette matrice, on peut retrouver des blocs de plus d'un mètre de diamètre. Ils sculptent le paysage en formant des kames ainsi que des terrasses de kames et d'eskers.

Alluvions et dépôts organiques

Les alluvions récentes de l'holocène couvrent les plaines d'inondation actuelles des vallées. Elles sont constituées de sables et de graviers interstratifiés de silt, d'argile et de matière organique. Elles se retrouvent dans la plupart des vallées, auparavant exploitées localement le long et dans le lit de la rivière Chaudière. Toutefois, l'exploitation des alluvions et dépôts organiques est limitée pour des raisons environnementales, car ces parcelles font office de filtre naturel.

5.3 Description des conditions de la qualité de l'eau

Selon le rapport d'activité du ministère de l'Environnement du Québec (MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE, 1996), les résultats obtenus pour le bassin de la rivière Chaudière révèlent que la qualité de l'eau s'est améliorée depuis le lancement des PAEQ (programmes d'assainissement des eaux du Québec). Ceux-ci visent à obtenir ou à maintenir une qualité d'eau qui permette de récupérer ou de préserver les usages actuels ou potentiels associés au milieu aquatique, la protection de la vie aquatique étant l'objectif capital visé pour tous les plans d'eau.

À plusieurs endroits sur la Chaudière, la qualité de l'eau, à l'été 1996, atteignait ou même surpassait le niveau souhaité pour trois paramètres clés de

Tableau 5.3 : Résumé de la qualité de l'eau sur la rivière Famine

Rivière Famine à Saint-Georges

Qualité de l'eau				Évolution temporelle de la qualité de l'eau. Comparaison des données estivales 1988-1990 vs 1996		
DBO_5	Coliformes fécaux	Phosphore total	IQBP	DBO_5	Coliformes fécaux	Phosphore total
Bonne*	Bonne*	Bonne*	Bonne*	Stable	Amélioration	Stable

* objectifs atteints

IQBP = L'indice de la qualité bactériologique et physico-chimique

DBO = Demande biochimique en oxygène

l'assainissement, soit les coliformes fécaux (pollution microbienne), la demande biochimique en oxygène (pollution organique) et le phosphore (pollution par les substances nutritives). Voici un tableau récapitulatif de la situation sur la Famine.

Malgré cette amélioration, la bande riveraine de la moyenne Chaudière où se situe le bras de la Famine est la plus dégradée de tout le bassin. Les cultures dominent au détriment de la forêt. L'empiètement des rives par les cultures réduit la diversité des habitats aquatiques et augmente l'apport de particules polluantes dans l'eau. Les données sur les organismes benthiques, (organismes vivant sur le fond ou dans les sédiments des habitats aquatiques comme les lacs, rivières, étangs, etc.) mettent en évidence des problèmes de pollution résiduelle à Saint-Georges, avec la diminution ou la perte de plusieurs organismes aquatiques sensibles à la pollution.

5.4 Inventaire des utilisateurs de l'eau souterraine

Selon le rapport d'activité du ministère de l'Environnement du Québec (MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE, 1996) et nos investigations sur le terrain, seulement les propriétaires de maison familiale

utilisent l'eau souterraine. Nous avons toutefois recensé une ferme aviaire utilisant l'eau souterraine. Nous avons intégré les données piézométriques provenant de celle-ci dans nos cibles de contrôle. De plus, nous avons identifié une sablière située près de Saint-Georges qui utilise un système fermé pour le nettoyage des matériaux. Toutes les autres entreprises pouvant être susceptibles d'utiliser une quantité relative d'eau pour leur besoins sont connectées à un système d'aqueduc.

5.5 Conclusion

Le bassin versant de la Famine a une superficie de 728 km^2 et est situé environ au centre-est du bassin versant de la rivière Chaudière (6 682 km^2). Son élévation moyenne est de 370 m, variant de 180 m à 550 m. Pour ce qui est de la géologie en place, le territoire est constitué de roches sédimentaires et volcaniques d'âge cambrien inférieur à ordovicien et fait partie de la province structurale des Appalaches. La majeure partie du territoire est occupée par la formation de Compton. Les dépôts meubles, soit la partie la plus importante de l'interaction entre l'eau de surface et le domaine souterrain, sont constitués d'un till assez compact, de dépôts fluvio-glaciaires ainsi que d'alluvions récentes.

À plusieurs endroits sur la Famine, le niveau de qualité de l'eau est considéré comme étant stable et satisfaisant pour les paramètres suivants : les coliformes fécaux, la demande biochimique en oxygène et le phosphore.

6.0 Provenance et description des données utilisées pour la mise en place du modèle conceptuel (MODFLOW)

Un modèle conceptuel est une représentation illustrée du système hydrique souterrain fréquemment représenté par des blocs diagrammes ou par des sections transversales. La nature du modèle conceptuel détermine la dimension du modèle numérique et de la conception de la grille. Le but de construire un modèle conceptuel est de simplifier la classification du sous-sol et d'organiser les différents champs de données pour que le système puisse être analysé plus facilement. Toutefois, des simplifications sont nécessaires pour rendre le projet réalisable. En théorie, plus le modèle conceptuel tend à décrire la réalité, plus le modèle numérique sera précis. Les étapes pour construire un modèle conceptuel sont : (1) définir les unités hydrostratigraphiques, (2) préparer un bilan hydrique (prise en charge par HYDROTEL), et (3) définir le système d'écoulement (pris en charge par PHYSITEL/HYDROTEL).

D'après MOORE (1979), les informations essentielles pour décrire efficacement des systèmes hydrologiques et hydrogéologiques et en faire la modélisation sont les suivantes :

Informations physiques

- 6.1.1 Cartes géologiques et coupes montrant les frontières régionales et verticales du système
- 6.1.2 Cartes topographiques
- 6.1.3 Cartes de l'épaisseur des sédiments provenant des lacs et rivières

Informations hydrologiques

- 6.2.1 Cartes piézométriques pour toutes les couches aquifères

- 6.2.2 Cartes et coupes de la conductivité hydraulique et de la transmissivité
- 6.2.3 Cartes et coupes des propriétés des aquifères et des lits confinés

6.1 Informations physiques

6.1.1 Cartes géologiques et coupes montrant les frontières régionales et verticales du système

En ce qui a trait aux informations concernant les cartes géologiques et les coupes montrant les frontières régionales et verticales du système physique, nous avons utilisé la synthèse géologique des Appalaches de l'Estrie-Beauce rédigée par SLIVITZKY et ST-JULIEN (1987) ainsi que les travaux de COUSINEAU *et al.* (1983); COUSINEAU (1990). Ceci dit, nous avons utilisé en grande partie les données du Système d'Information Hydrogéologique (SIH) du ministère de l'Environnement du Québec.

6.1.2 Carte topographique

Par souci de précision du couplage des deux modèles HYDROTEL/MODFLOW, nous avons exploité la même carte topographique (modèle numérique d'altitude, figure 6.1 provenant de GÉOBASE) qu'HYDROTEL utilise à partir de GIBSI. La discrétisation faite par celle-ci est une maille d'une grandeur de 100 m par 100 m donnant l'élévation par rapport aux niveaux moyens des mers avec une résolution arrondie de ± 1 mètre, une précision altimétrique de ± 5 mètres et une précision planimétrique de 30 mètres.

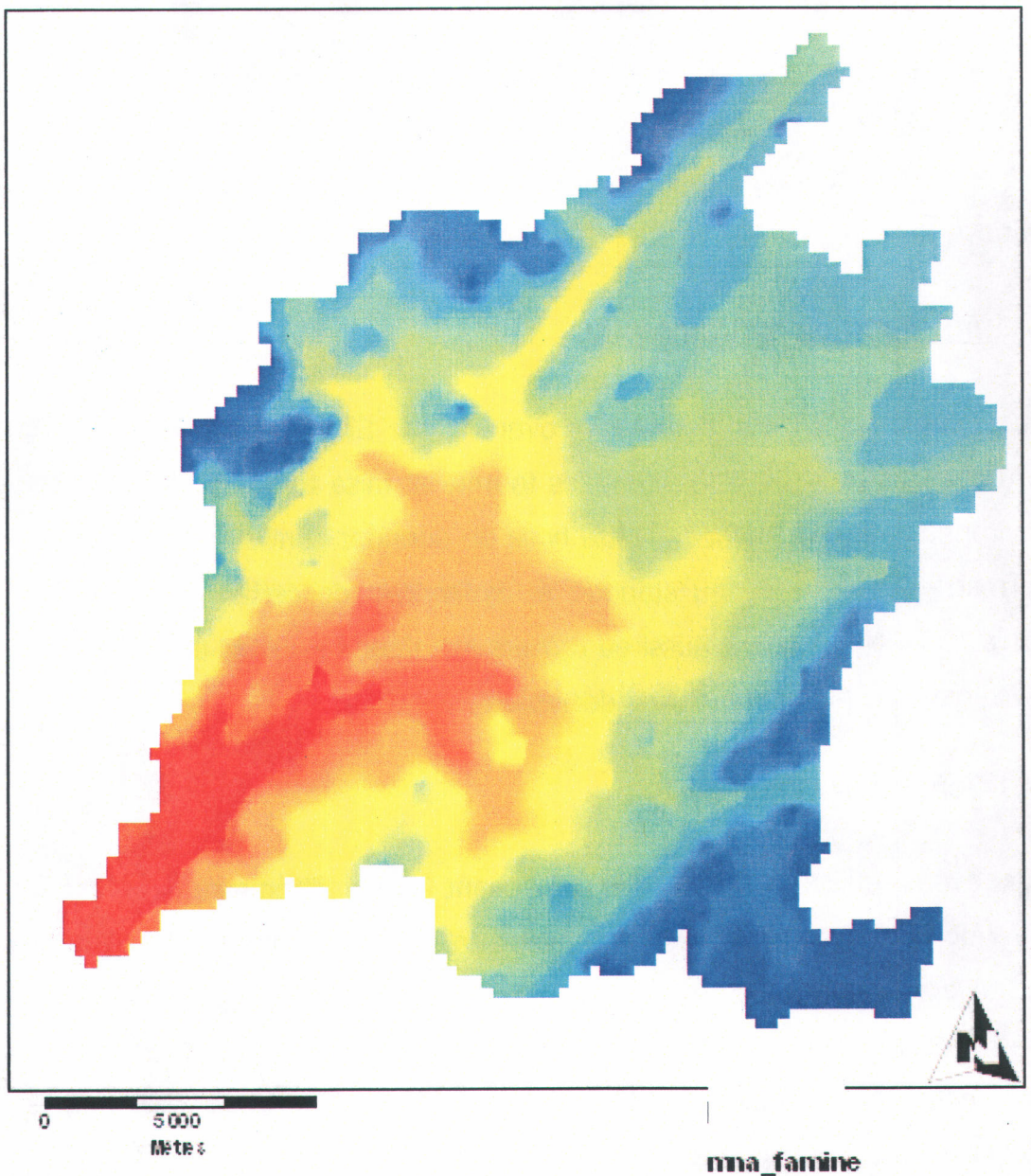


Figure 6.1 : Image du modèle numérique d'altitude du bassin versant de la Famine.

6.1.3 Épaisseur des sédiments

Nous avons utilisé les inventaires des ressources en granulats des rapports MB 97-16 et MB 97-21 du ministère des Ressources naturelles (BRAZEAU 1998, a,b) pour évaluer l'épaisseur des sédiments dans certaines vallées et dans les cours d'eau.

6.2 Informations hydrologiques

Nous avons utilisé les données provenant du SIH « Système d'Information Hydrogéologique » (base de données fournie et mise à jour par le ministère de l'Environnement du Québec). Cette base de données contient, entre autres, des informations sur le niveau statique et dynamique de certain puits au Québec depuis 1968. Nous avons aussi eu recours aux données prises directement sur le terrain dans les puits personnels décrits au chapitre 7.

6.2.1 Conductivité hydraulique

Nous avons utilisé les données provenant de la littérature (DOMINICO et SCHWARTZ 2002) pour estimer les valeurs initiales de la conductivité hydraulique (en moyenne de 0.864 (m/j). Par la suite, dépendamment des résultats obtenus après les simulations, nous avons utilisé la méthode d'essai et erreur ainsi que l'expérience professionnelle de Daniel Paradis de la Commission géologique du Canada, bureau de Québec, pour définir les valeurs. Le programme CAPSEC (NASTEV *et al.* 2004) a été utilisé seulement dans le but de comparer l'ordre de grandeur des données (annexe B) de conductivité hydraulique de $3 * 10^{-5}$ (m/s)

6.2.2 Stratigraphie

La stratigraphie fut caractérisée à partir d'une compilation des données suivantes :

- Cartes des dépôts de surface pour les régions 21L/01, 02, 07, 08 (Commission géologique du Canada par BLAIS et SHILTS 1992)
- Système d'information hydrogéologique (banques des puisatiers)

Après avoir étudié plus de 1 090 points caractérisés (présentés à la l'annexe D) à partir des bases de données mentionnées ci-dessus, nous avons été en mesure de corréler les informations pour déterminer les caractéristiques hydrauliques des aquifères sur 403 points (voir figure 7.1).

6.3 Données de recharge

Comme nous l'avons mentionné, le contexte d'abondance de l'eau de surface au Québec fait en sorte que la ressource souterraine est exploitée sans vraiment être comprise. Nous voulons être en mesure de développer un outil qui puisse opérer et gérer le système entier de la ressource eau. Bien sûr, ce dispositif dépend non seulement de la disponibilité de la ressource, mais aussi des contraintes légales, politiques et socio-économiques. HYDROTEL donne un rendement très satisfaisant en ce qui a trait aux données simulées du débit en rivière. Étant donné la géologie et les conditions de nappe libre, le flux d'eau qui s'infiltre de la deuxième couche vers la troisième serait approprié comme intrant pour simuler la recharge (m/jour) dans MODFLOW.

6.3.1 Procédure d'extraction des données

Après avoir exécuté des simulations avec HYDROTEL, il a été possible d'extraire l'infiltration q_{2_3} du bilan vertical. Les simulations ont été exécutées sur chaque UHRH (unité hydrique relativement homogène) et en tout 183 UHRH ont été définies sur le bassin versant de la Famine. Chaque UHRH regroupe une certaine quantité (différente pour chacune d'entre elles) de mailles de 100 m par 100 m. Étant donné que nous utilisons la même discrétisation (mailles de 100 m par

100 m) dans le modèle hydrogéologique, nous avons élaboré une application pour pouvoir extraire les données sous une forme matricielle de même grandeur.

Tout d'abord, il faut savoir qu'HYDROTEL simule une seule valeur de flux q_{2_3} par UHRH avec un pas de temps journalier. Nous avons dû diviser cette valeur de flux par le nombre de mailles que compose chaque UHRH pour obtenir une valeur journalière sur chaque maille. Par la suite, nous avons décidé de faire une moyenne par mois de ces valeurs journalières (sur chaque maille). Étant donné que les unités sont en m/jour seulement, une matrice de valeur devait être introduite au modèle conceptuel de MODFLOW par mois. Cette décision fut prise dans l'optique où le système souterrain a un temps de réponse beaucoup plus lent que le système hydrologique. Le tableau 6.3 présente les valeurs moyennes d'infiltration de tous les UHRH du bassin versant de la Famine et la précipitation pour la station Saint-Georges. Les valeurs égales à zéro (février-2003, janvier-2004 et février-2004) ont été modifiées car elles étaient préalablement négatives dû à la modélisation d'HYDROTEL. Les matrices de recharges ne sont pas présentées dans ce travail car il y en a 24 et elles comportent chacune 350 lignes par 350 colonnes.

Les figures 6.2 et 6.3 présentent la variation de l'infiltration $q\ 2_3$ pour chaque mois et un cumulatif pour l'année complète. Il est intéressant de comparer les valeurs d'infiltration à celles des précipitations présentées aux figures 6.4 et 6.5. Les valeurs d'infiltration totales par année, selon HYDROTEL, correspondent environ à la moitié des valeurs de précipitation totales par année. De plus, nous pouvons observer une tendance similaire des histogrammes sur chaque mois. Les données d'infiltration sont décalées de quelques mois sur celles des précipitations. Par exemple, pour les mois de janvier, février et mars 2004, les précipitations sont relativement faibles, l'infiltration est nulle pour les mois de

janvier et février et revient avec 41 mm en mars pour un total de 92 mm de précipitation pour l'ensemble des trois mois.

Tableau 6.3 : Valeurs moyennes du taux d'infiltration sur l'ensemble des 183 UHRH sur le bassin versant de la Famine et des précipitations à la station Saint-Georges

Date	Précipitations mensuelles moyennes enregistrées à la station de St-Georges (mm)	Cumulatif des précipitations (mm)	Valeur moyenne d'infiltration (mm/mois)	Valeur cummulative d'infiltration (mm/an)
juin-02	112	0	56,95	0
juil-02	170,2	112,00	69,81	56,95
août-02	16,8	282,20	10,88	126,76
sept-02	85	299,00	72,97	137,64
oct-02	60	384,00	47,13	210,61
nov-02	86,7	444,00	28,22	257,74
déc-02	52	530,70	8,33	285,95
janv-03	20	582,70	1,08	294,28
févr-03	57	602,70	0,00	295,36
mars-03	73,1	659,70	41,32	295,36
avr-03	95,9	732,80	25,43	336,68
mai-03	89	828,70	40,56	362,11
total par an		917,70		402,67
juin-03	109	0	36,94	0
juil-03	178	109,00	91,58	36,94
août-03	160	287,00	50,98	128,52
sept-03	29	447,00	23,27	179,50
oct-03	117	476,00	66,25	202,77
nov-03	110	593,00	19,58	269,03
déc-03	222,1	703,00	11,86	288,61
janv-04	26	925,10	0,00	300,47
févr-04	44	951,10	0,00	300,47
mars-04	22	995,10	41,53	300,47
avr-04	49,9	1017,10	25,44	342,00
mai-04	121	1067,00	54,83	367,44
total par an		1188,00		422,27

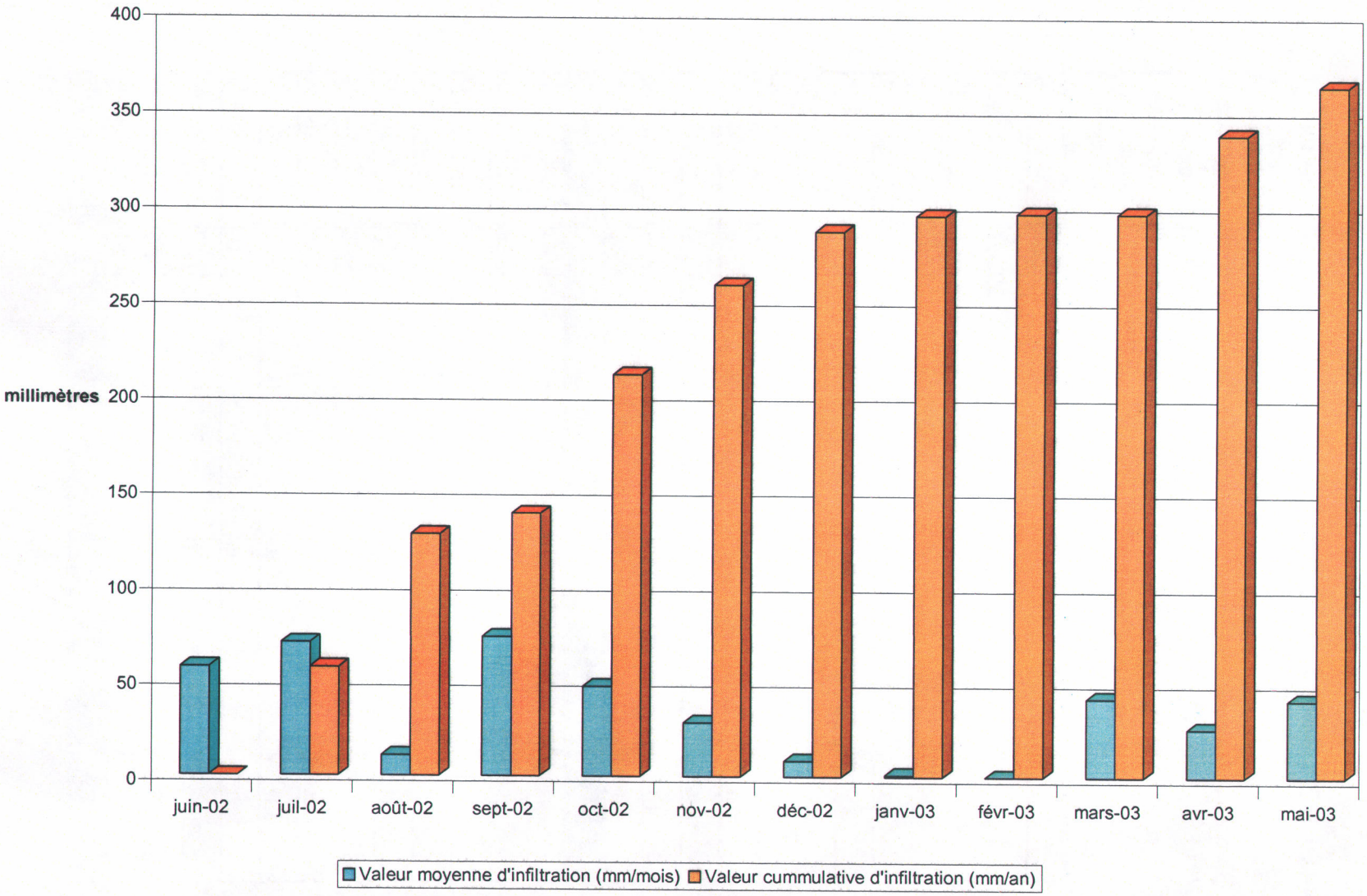


Figure 6.2 : Variation de l'infiltration *q 2_3* pour chaque mois et un cumulatif pour l'année complète juin 2002 à mai 2003.

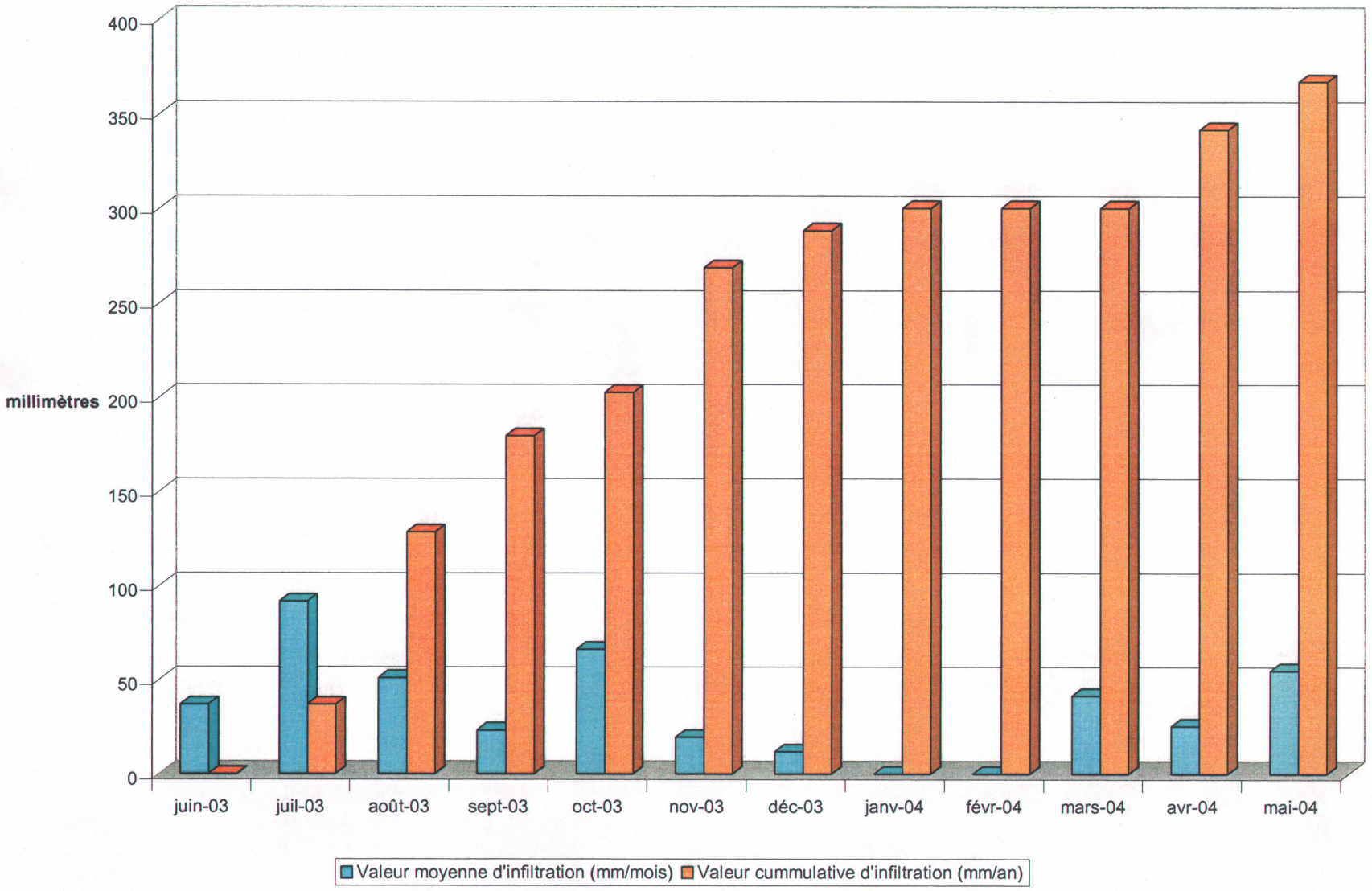


Figure 6.3 : Variation de l'infiltration *q 2_3* pour chaque mois et un cumulatif pour l'année complète juin 2003 à mai 2004

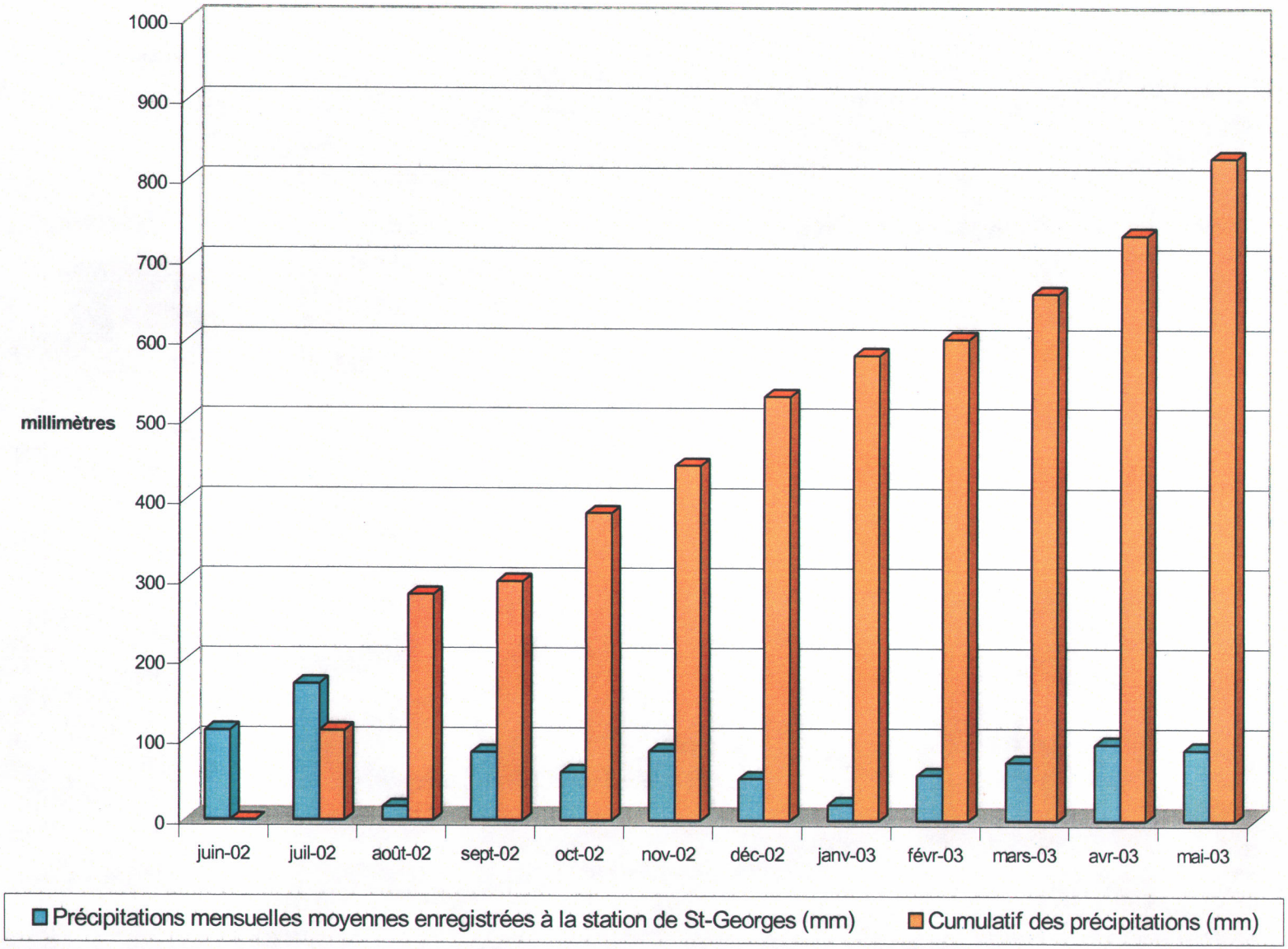


Figure 6.4 : Précipitations pour la station Saint-Georges de mai 2002 à mai 2003

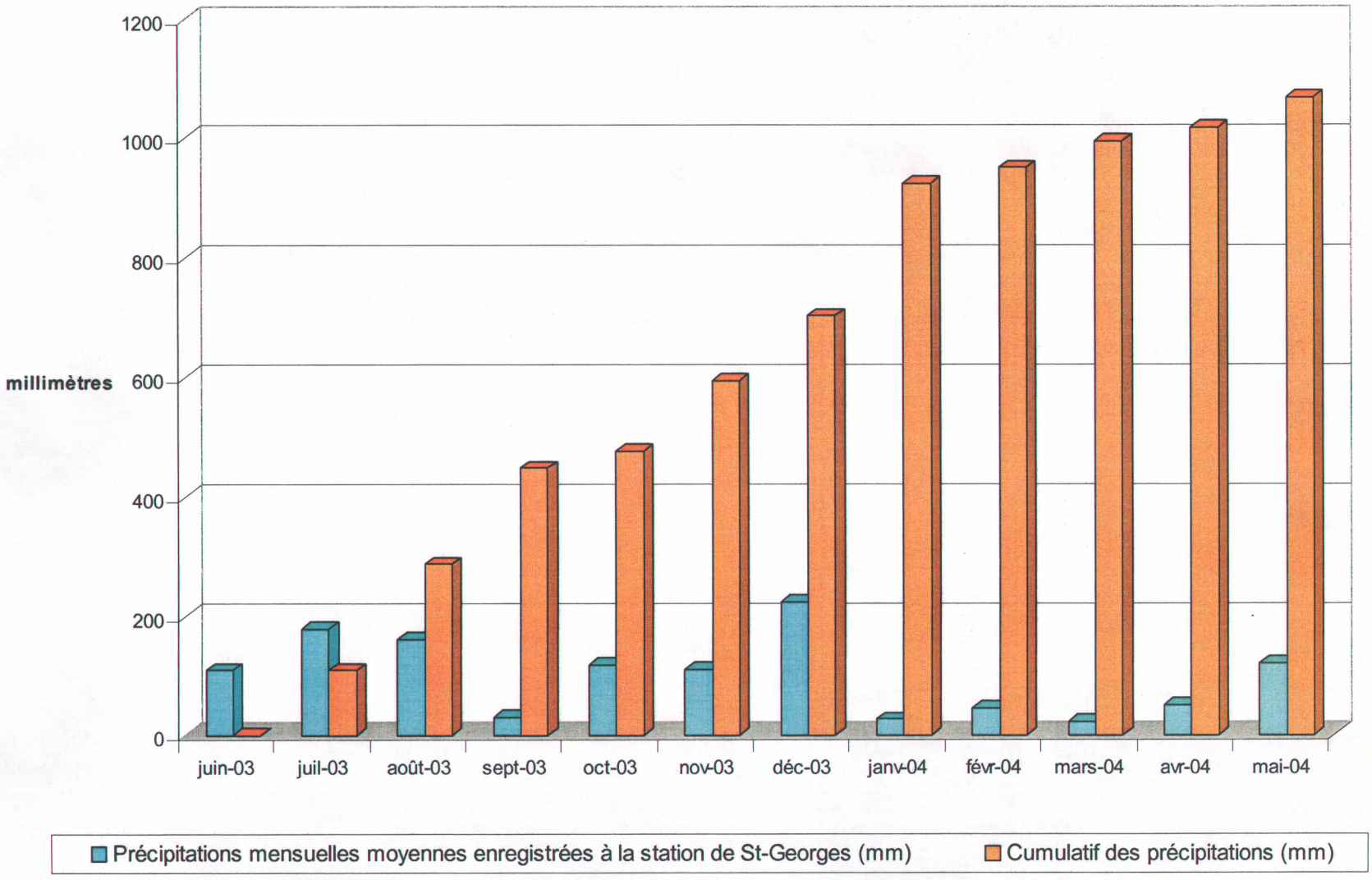


Figure 6.5 : Précipitations pour la station Saint-Georges de mai 2003 à mai 2004

6.4 Conclusion

Ce chapitre démontre la façon dont nous avons procédé pour conceptualiser le modèle. Nous avons utilisé des informations physiques telles que des cartes géologiques et des dépôts meubles et topographiques. De plus, nous avons trouvé et prélevé des informations hydrologiques avec l'aide de la banque des puisatiers, des prélèvements piézométriques dans les puits privés de la région ainsi que par les forages au diamant. Les données de recharge sont, en fait, les données d'infiltration *q 2_3* du modèle HYDROTEL du module BV3C. Que ce soit pour uniformiser les unités ou bien le format des données disponibles, plusieurs manipulations ont dû être nécessaires avant d'introduire les données au modèle hydrogéologique. Les précipitations enregistrées semblent appuyer les données d'infiltration, à ce qu'on peut observer aux figures 6.2 à 6.5.

7.0 Construction du modèle numérique

7.1 Distribution des points de contrôle du niveau d'eau et de l'épaisseur des dépôts

Nous disposons d'une description lithologique couvrant assez bien le territoire. En effet, après un triage, nous avons répertorié 403 points (détail à l'annexe D) distribués spatialement sur l'ensemble du bassin. La Famine a une superficie de 728 km^2; nous avons donc une moyenne d'un point caractérisé tous les 1,8 km^2. (Voir figure 7.1). Ces points représentent des puits ayant été forés pour usage domestique à la consommation d'eau, ou encore des forages au diamant pour l'exploitation minière. Ceux-ci sont décrits par séquences géologiques selon les unités décrites à la section 5.2.

7.2 Construction du modèle numérique

Lors de la construction de la base de données, nous avons utilisé une épaisseur de matériau de l'aquifère maximum et constante de 300 m de profondeur par rapport à l'élévation de chaque maille sur le bassin (voir figure 7.2). La plupart des concepts hydrogéologiques prennent en considération plus de 1 000 mètres de profondeur (ANDERSON et WOESSNER 1992). Toutefois, les conditions géologiques (roche très peu perméable et de même unité) des Appalaches nous permettent cette approximation à la baisse de l'écoulement régional.

Par la suite, une division en six couches le long du profil vertical fut mise en place pour une meilleure évaluation du système de réponse. Cette délimitation est intimement reliée à celle faite par HYDROTEL. L'utilisation des données d'infiltration *q_2_3* provenant d'HYDROTEL comme données de recharge dans MODFLOW découle de l'absence de précision et d'information des processus physiques de la troisième couche du module BV3C.

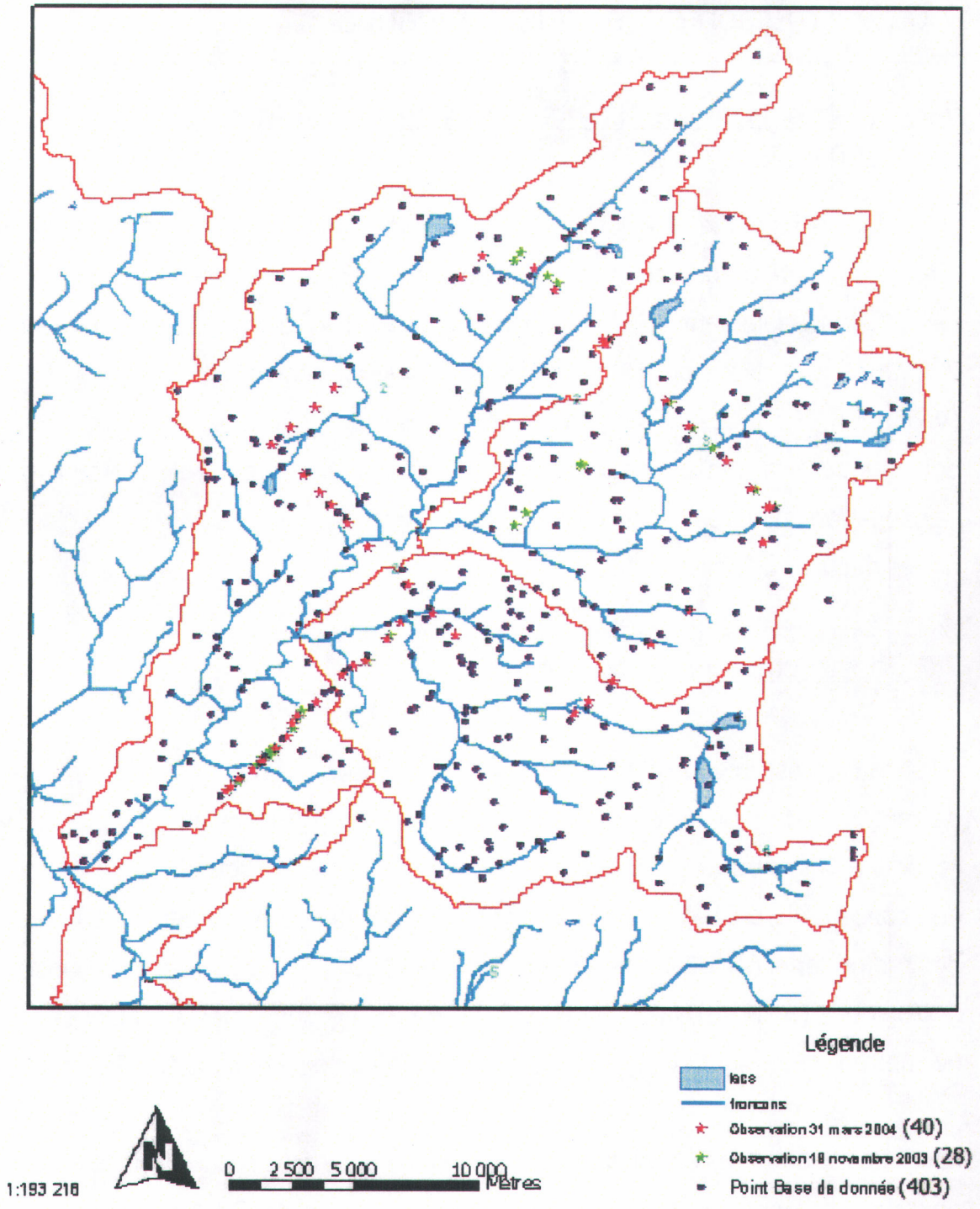


Figure 7.1 : Carte des points d'observation du niveau d'eau sur le terrain (68) et d'épaisseur des sédiments de la base de données (403).

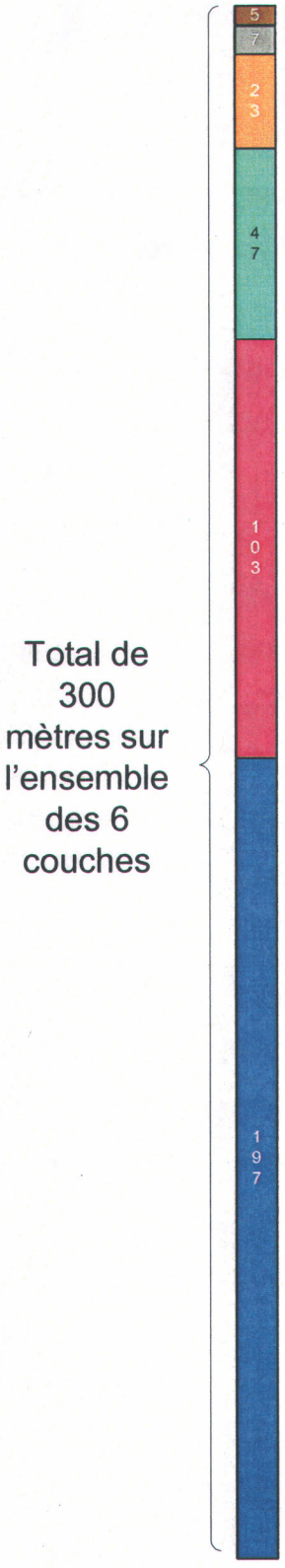


Figure 7.2 : Représentation visuelle des six couches du modèle numérique souterrain.

La troisième couche étant la plupart du temps saturé, suite à la modélisation, nous avons décidé d'entreprendre une modélisation d'écoulement souterrain à partir de cette couche. HYDROTEL opère les deux premières couches mesurant respectivement 6,75 cm et 15,25 cm (l'épaisseur des deux couches fait suite au calage sur la région étudiée) et MODFLOW entreprend sa modélisation à partir des données d'infiltration de la couche deux vers la couche trois. Il faut mentionner que les paramètres de saturation par HYDROTEL $K(\theta_S)$ à 22 cm du sol n'ont pas été pris en compte dans la conceptualisation du modèle souterrain.

MODFLOW génère des calculs sur six couches successives d'une épaisseur variable de 5, 7, 23, 47, 103 et 197 m pour un total de 300 m de profondeur (Figure 7.1). Cette délimitation nous permet de bien comprendre les interactions de l'eau de surface s'infiltrant dans les premiers mètres de sol et les tendances régionales de l'écoulement souterrain. Les épaisseurs des couches ont été choisies en fonction des différents matériaux spatialement distribués. Nous devions respecter certaines contraintes d'épaisseur à cause du module d'interpolation de la stratigraphie de MODFLOW. MODFLOW n'accepte pas un lien entre deux matériaux si la différence d'épaisseur dépasse la hauteur de la couche ou si la pente est trop grande. La figure 7.3 donne un aperçu de l'interpolation des unités stratigraphiques de la première couche sur l'ensemble du bassin à partir des 403 points de contrôle. Malheureusement, le logiciel MODFLOW n'a pas de fonction créatrice de cartes lors de la construction du modèle numérique. C'est pourquoi, nous avons dû présenter une impression d'écran.

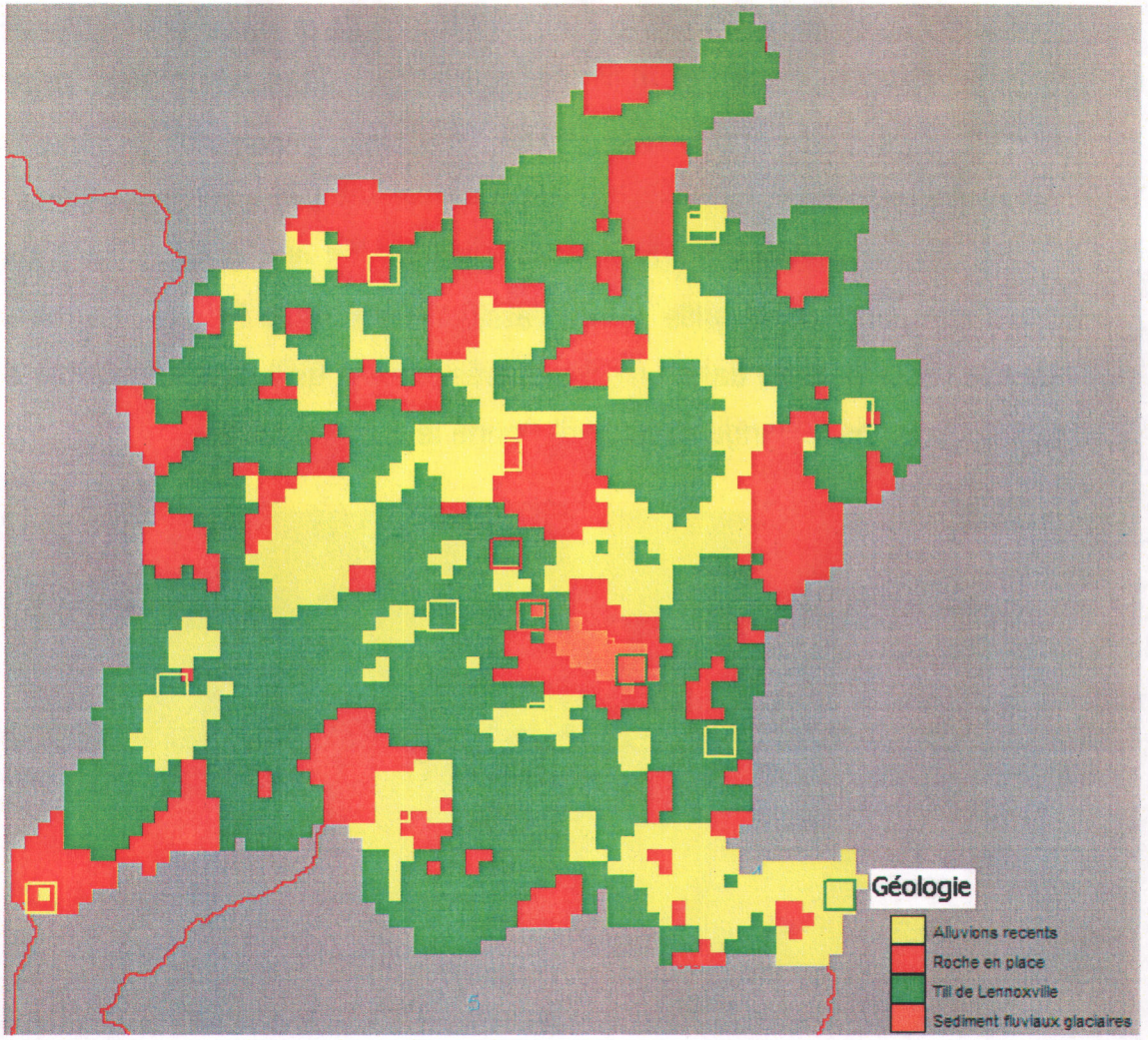


Figure 7.3 : Image en plan de la couche de surface du bassin versant de la Famine tel qu'interpolé avec 403 points de contrôle.

7.3 Caractérisation du maillage

Pour représenter la modélisation de la surface, nous avions le choix d'utiliser le procédé des *TINs* (*Triangulated Irregular Network*), fréquemment utilisés dans le domaine pour représenter les unités géologiques, ou bien une grille 3D. Par souci de précision du couplage entre nos deux modèles, nous avons décidé de conserver des prismes rectangulaires de même taille que celle faite par HYDROTEL (soit selon l'axe des x et y). Les UHRH définies par HYDROTEL ont

une forme irrégulière, par contre elles sont constituées de prismes rectangulaires. En effet, la dimension de la maille respecte les subdivisions des UHRH d'HYDROTEL, c'est-à-dire 100 m par 100 m. Toutefois, l'épaisseur des mailles varie selon la profondeur assignée aux couches. Le total des cellules s'élève à 128 083 par couche, totalisant pour les six couches 768 498 cellules. La figure 7.4 montre une partie de la grille 2D du bassin versant de la Famine. La raison pour laquelle l'ensemble du bassin n'est pas présenté est qu'il était impossible de distinguer les prismes rectangulaires étant donné leur petite taille.

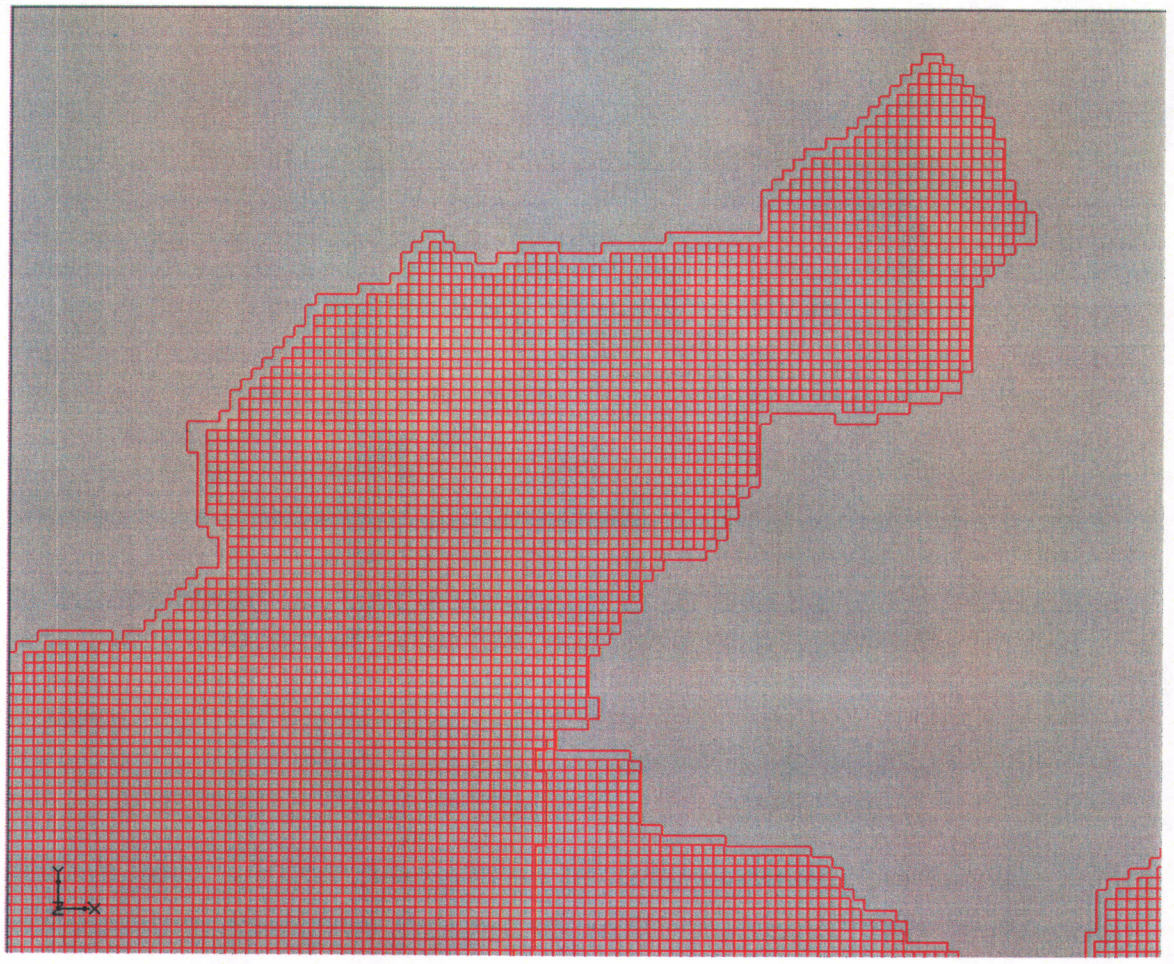


Figure 7.4 : Aperçu de la grille MODFLOW 2D du modèle conceptuel du bassin versant de la Famine.

7.4 Niveaux piézométriques mesurés sur le terrain

Les valeurs des niveaux piézométriques (tableau 7.4) ont été relevées avec l'aide d'une sonde hydrométrique graduée au centimètre près. Nous avons utilisé une carte de la région à l'échelle de 1: 50 000 pour se localiser. Les points ont été retranscrits selon leurs coordonnées X et Y (UTM zone 19). Pour déterminer l'altitude, nous avons utilisé le MNA.

Tableau 7.4 : Niveaux piézométriques des 68 points de contrôle

Emplacement des points de contrôle (UTM zone 19)		Niveau d'eau par rapport à la surface (m)	Emplacement des points de contrôle (UTM zone 19)		Niveau d'eau par rapport à la surface (m)
Nord	Est		Nord	Est	
375750	5112800	-1	378300	5115500	-0,6
387200	5123600	-2,3	378500	5115850	-2,9
388900	5133450	-1,2	379250	5116400	-4,25
388500	5133800	-2,1	380300	5117500	-1,5
387150	5134400	-2,2	380750	5117900	-1,9
376100	5113100	-3,6	381200	5118100	-5,2
376850	5113800	-3,1	382100	5119000	-1,35
377075	5114100	-1,9	382675	5119650	-3,6
377150	5114150	-0,6	383950	5120000	-1,2
377250	5114150	-3,3	384850	5119150	-0,35
377400	5114200	-1,3	389675	5116000	-1,2
377400	5114400	-1,1	390200	5116450	-1,8
377600	5114550	-1,2	391200	5117300	-2,2
377600	5114400	-2,7	392725	5118800	-2,1
378300	5115300	-0,5	394250	5120150	-5,9
378500	5115750	-2,9	397400	5124300	-3,9
378650	5116050	-1,1	397500	5124400	-0,8
382200	5119100	-3,5	396700	5125150	-7,5
387650	5124100	-2,3	395750	5126250	-1,55
389850	5126100	-1,8	394200	5127700	-1
389900	5126050	-1	390875	5131000	-1,65
397700	5124400	-2,7	390750	5131200	-0,8
395200	5126750	-1,2	388800	5133200	-1,2
393450	5128600	0	387950	5134100	-1,55
390950	5131150	-1,8	385850	5134600	-1,9
387400	5134750	-1,5	385000	5133750	-1,85
394350	5127600	-1	379150	5128400	-7,4
375625	5112750	-0,85	377450	5126900	-5,9
375850	5112950	-1,15	379400	5124950	-3,25
376150	5113250	-3	379850	5124400	-1,2
376700	5113650	-1,57	380500	5123700	-7,25
377050	5114000	-3,3	381300	5122750	-2,1
377625	5114475	0	382950	5121200	-2,2
378100	5115000	-5	397250	5122950	-5,6

7.5 Caractérisation des rivières

Les rivières ont été délimitées selon les couches vectorielles utilisées par GIBSI. Nous avons défini le même nombre de tronçons dans GMS que dans HYDROTEL. Les tronçons de rivières sont en fait un amalgame totalisant 123 arcs redessinés. Ceux-ci ont tout d'abord été créés par PHYSITEL (TURCOTTE *et al.* 2001) selon des critères tels que la surface drainée ou des paramètres prédéfinis de longueur. Lorsque les arcs sont générés dans GMS, chaque cellule traversant l'arc est caractérisée et prise en considération par le modèle selon certains attributs demandés tels que :

- Conductance (m^2/jr) (est la même pour tous les arcs)
- Cote limnimétrique (m)
- Élévation du lit de la rivière (m)

Ces valeurs ont été saisies à partir du MNA et des bases de données fournies par HYDROTEL. Toutefois, aucune donnée sur la hauteur d'eau dans les rivières n'a été recensée. Nous nous sommes basés sur une classification des rivières en fonction de l'ordre Strahler et sur les observations faites sur le terrain pour poser des hypothèses. C'est en combinant les données de largeur des tronçons (obtenues à partir d'un SIG) et les valeurs d'hauteur d'eau relevées sur le terrain que nous avons pu estimer la hauteur d'eau selon l'ordre Strahler. Voici les valeurs de hauteur d'eau qui ont été définies par défaut pour les 123 tronçons sur le sous-bassin de la Famine :

- Ordre 1 : 0,35 m
- Ordre 2 : 0,60 m
- Ordre 3 : 1,40 m
- Ordre 4 : 2,00 m

7.6 Valeur par défaut

Plusieurs paramètres doivent être définis par l'utilisateur, soit : les périodes de stress, les différents progiciels utilisés, les unités, le nombre d'itérations, les critères de convergence, les types de couches, les fichiers de sortie, etc. En tout, une trentaine de critères doivent être définis au choix.

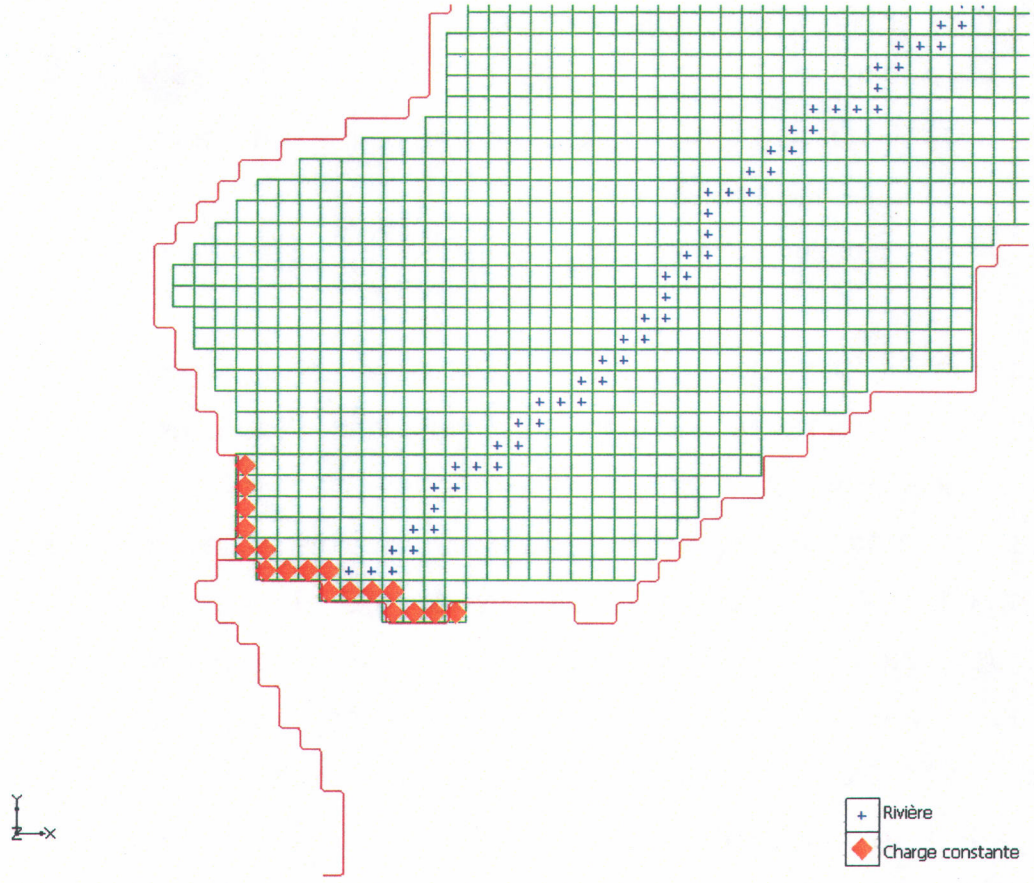


Figure 7.5 : Conditions limites à charges constantes à l'exutoire du bassin versant de la Famine.

7.7 Conditions aux limites

Les six frontières du domaine 3D dans MODFLOW (le dessus, le dessous et les côtés) sont par défaut; des limites où l'écoulement est nul. De plus, comme DOMINICO et SCHWARTZ (1998) le propose, nous avons mis des limites à charge constante là où il y avait présence de lacs. À l'exutoire, l'écoulement de l'eau vers une zone de décharge nous impose aussi de border le dernier tronçon de rivière avec des limites à charge constante. La figure 7.5 montre les conditions limites à charge constante à l'exutoire du bassin versant de la Famine.

7.8 Conclusion

La caractérisation des données fut un long processus dû au manque d'uniformisation des différentes sources utilisées. La conception de la base de données nous donna un total de 403 points de contrôle d'épaisseur des sédiments et 68 points de contrôle du niveau d'eau répartis sur l'ensemble du bassin. Pour la conceptualisation du modèle, nous avons eu recours à une maille cubique de 100 m par 100 m sur six couches ayant une épaisseur totale de 300 mètres. La caractérisation des rivières a été définie en fonction des données prélevées sur le terrain, la largeur des segments à partir d'un SIG et leur ordre Strahler. Les conditions aux limites ont été imposées par défaut, nulles à l'extérieur des limites 3D et à charge constante là où il y a des lacs et à l'exutoire (zone de décharge).

8.0 Simulations avec MODFLOW

8.1 Analyse de sensibilité

Nous avons identifié les paramètres importants du modèle, c'est-à-dire ceux nécessitant le plus d'attention durant la prise des données. La méthode employée ainsi que les résultats sont présentés ci-dessous.

8.1.1 Définition de l'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité permet d'évaluer l'importance relative des différentes caractéristiques du milieu et des processus mis en cause, d'établir le niveau de précision et d'orienter l'acquisition des données au niveau des techniques et méthodes de mesures de celles-ci.

L'analyse de sensibilité paramétrique qui quantifie les effets de la variation d'une variable d'entrée sur les résultats de la simulation est un cas particulier d'analyse de sensibilité (McCUEN 1973). Elle est utile dans toutes les étapes d'un projet de modélisation.

8.1.2 Méthode

Nous avons effectué une étude de sensibilité sur huit paramètres nécessaires à la conception du modèle.

Les valeurs (ν) ont été modifiées selon l'intervalle $\nu/10 \leq \nu \geq 10\nu$ d'amplitude, et ce par rapport aux valeurs calées. Elles ont été changés une après l'autre pour évaluer avec précision leur importance. Les paramètres sont : la conductivité hydraulique horizontale des sédiments fluviaux glaciaires, la conductivité hydraulique horizontale du till, la conductivité hydraulique horizontale des alluvions récentes, la conductivité hydraulique horizontale de la roche en place (code 11), la conductivité hydraulique horizontale de la roche en place (code 12),

la conductivité hydraulique horizontale de la roche en place (code 13), de la conductance des rivières et le niveau piézométrique initial.

Les simulations ont été réalisées sur une période de deux ans avec un pas de temps mensuel. Les valeurs sont présentées selon :

- Erreur moyenne

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - x_{obs,i}\right)$$

- Erreur moyenne absolue

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|x_i - x_{obs,i}\right|$$

- Erreur moyenne quadratique

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - x_{obs,i}\right)^2}$$

8.1.3 Résultats

Conductivité hydraulique

En général, les valeurs de conductivité hydraulique du modèle représentent des conditions vraisemblables (validées dans la littérature et comparées avec l'aide du modèle CASPSEC) (NASTEV *et al.* 2004). Nous pouvons remarquer que plus l'épaisseur et le volume des matériaux sont importants, plus les conséquences d'un changement sont remarquables. Par exemple, si nous analysons les effets de changement (voir tableau 8.1) pour les alluvions récentes et les sédiments fluviaux glaciaires qui ont une épaisseur moyenne de 5 m et un volume relativement petit sur l'ensemble du bassin, nous remarquons des changements mineurs sur l'ensemble des réponses.

Toutefois, lorsque nous analysons les résultats face aux changements des deux dernières couches de roche en place, les effets sont beaucoup plus significatifs. Ces deux couches ont une épaisseur de 100 m et représentent un volume considérable sur l'ensemble du modèle. En effet, plus la conductivité hydraulique augmente ou diminue, plus l'erreur augmente.

Conductance des rivières

La conductance des rivières permet d'évacuer plus ou moins d'eau de la rivière vers la nappe. Alors, plus la valeur est élevée, plus l'eau est drainée vers le souterrain, vice-versa lorsqu'elle est faible, l'eau s'accumule à la surface. C'est pour cette raison que l'augmentation de l'erreur reste semblable dans les deux cas. En effet, soit que la nappe soit trop haute ou trop profonde par rapport aux données prises sur le terrain. Somme toute, ce paramètre ne semble pas très sensible vu la différence d'erreur par rapport aux valeurs optimales.

Niveau piézométrique initial

Ce paramètre est celui qui a le plus d'effet sur l'ensemble des réponses. En effet, une différence de 2 m sur la valeur optimale fait varier de plus de trois fois l'erreur moyenne. Par ce comportement, il est primordial de le caler en premier lieu. Il est intéressant de noter qu'en diminuant le niveau piézométrique initial a –5 m en dessous du modèle d'élévation numérique, l'erreur est diminuée. Toutefois, nous remarquons qu'en effectuant ce changement, la première couche du modèle devient complètement desséchée (MODFLOW est incapable de la remouiller pour le reste de la simulation), et que la deuxième est complètement inondée. Ces conditions ne représentent malheureusement pas la réalité. C'est pourquoi nous avons choisi de garder une erreur plus importante mais en conservant un modèle représentant le plus possible les conditions observées.

Tableau 8.1 : Résultats de l'analyse de sensibilité

Matériaux et caractéristiques changées	Valeurs hydrauliques simulées	Amplitude du changement	Erreur moyenne	Erreur moyenne absolue	Erreur moyenne quadratique
3 Sédiments fluviaux glaciaires					
Conductivité hydraulique horizontale	0.0864	0.1	2,074	2,731	5,768
(m/j)	0.864	1.0	1,991	2,716	5,74
	8,64	10	2,153	2,816	5,889
2 Till de Lennoxville					
Conductivité hydraulique horizontale	0.0864	0.1	2,145	2,652	5,688
(m/j)	0.864	1.0	1,991	2,716	5,74
	8,64	10	2,381	3,006	6,181
7 Alluvions récents					
Conductivité hydraulique horizontale	0.0864	0.1	2,143	2,649	5,677
(m/j)	0.864	1.0	1,991	2,716	5,74
	8,64	10	2,245	2,957	6,025
11 Roche en place					
Conductivité hydraulique horizontale	0,0432	0.1	2,2	2,76	5,879
(m/j)	0,432	1.0	1,991	2,716	5,74
	4,32	10	2,41	3,715	7,098
12 Roche en Place					
Conductivité hydraulique horizontale	0,00864	0.1	2,468	3,731	6,978
(m/j)	0,0864	1.0	1,991	2,716	5,74
	0,864	10	2,931	3,959	8,013
13 Roche en Place					
Conductivité hydraulique horizontale	0,000864	0.1	2,41	3,715	7,099
(m/j)	0,00864	1.0	1,991	2,716	5,74
	0,0864	10	2,45	3,789	7,15
Rivière					
Conductance	10	0.1	2,128	2,804	5,884
(m^2/j)	100	1.0	1,991	2,716	5,74
	1000	10	2,17	2,822	5,892
Niveau de l'eau					
Niveau piézométrique initial	0	2	6,734	6,374	9,409
(m) en-dessous de MÉN	-2	0	1,991	2,716	5,74
	-5	-3	1,357	1,38	5,702

Pour évaluer les résultats de l'analyse de sensibilité, nous avons utilisé la valeur hydraulique simulée et nous l'avons divisée par chaque valeur qui a subi un changement d'amplitude, soit $\nu/10$ et 10ν. Par la suite, nous avons fait une moyenne pour chaque paramètre et les résultats varient entre 0,74 et ,94. Les paramètres ayant une moyenne au-dessus de 0,90 sont considérés comme ayant un effet mineur. Ceux ce situant entre 0,80 et 0,90 sont considérés comme ayant un effet important et ceux se situant en dessous de 0,80 sont considérés comme ayant un effet majeur sur la modélisation.

la conductivité hydraulique horizontale des sédiments fluviaux glaciaires a un effet mineur sur le système, la moyenne des valeurs étant de 0,94. Il est à noter que ce matériau se retrouve en petite quantité sur l'ensemble du domaine. La conductivité hydraulique horizontale du till a un effet important sur le système, la moyenne des valeurs étant de 0,88. Il se retrouve sur une grande partie du domaine en surface. La conductivité hydraulique horizontale des alluvions récentes a un effet mineur sur le système, la moyenne des valeurs étant de 0,91. Il est à noter que ce matériau se retrouve en petite quantité sur l'ensemble du domaine. La conductivité hydraulique horizontale de la roche en place (11) a un effet important sur le système, la moyenne des valeurs étant de 0,87. Il est à noter que l'effet est similaire pour le changement d'amplitude $\nu/10$ et 10ν. La conductivité hydraulique horizontale de la roche en place (12) a un effet majeur sur le système, la moyenne des valeurs étant de 0,74. Il est considéré comme le matériau le plus influent du modèle. La conductivité hydraulique horizontale de la roche en place (13) a un effet important sur le système, la moyenne des valeurs étant de 0,82. Il est considéré comme le deuxième matériau le plus sensible. La conductance des rivières a un effet mineur sur le système, la moyenne des valeurs étant de 0,93, probablement dû au temps de réponse lent. Le niveau piézométrique initial a un effet important sur le système, la moyenne des valeurs étant de 0,88. L'effet est plus significatif lorsqu'il y a une augmentation du niveau

d'eau. Il est à noter que même si la valeur de l'erreur s'améliore en diminuant le niveau d'eau, la première couche se trouve desséchée, ce qui est à éviter. L'analyse de sensibilité nous a permis de découvrir que le matériau le plus réactif, et donc le plus influent, est notre deuxième sorte de roc fracturé (roche en place (12)). Il paraissait plus logique que se soit le till, le matériau le plus influent vu la grande quantité que l'on retrouve sur le bassin. Il faut aussi tenir compte de l'importance du niveau d'eau initial qui influence grandement les résultats. Malheureusement, MODFLOW ne peut réhydrater une couche une fois qu'elle est devenue sèche, faussant complètement les résultats.

8.2 Calage des données

Une des phases les plus importantes dans l'exercice d'application d'un modèle hydrogéologique est le calage. Le principal rôle du modèle étant la prédiction, il est primordial que celui-ci puisse simuler avec succès les comportements des aquifères en observation. Le calage d'un modèle d'écoulement se caractérise par une justification que le modèle est capable de reproduire les données de hauteur piézométrique à celles acquises sur le terrain (TURCOTTE et *al.* 2003). Lors de ce processus de calage, certains paramètres quantitatifs, comme la conductivité hydraulique, la porosité, l'emmagasinement ou bien la conductance, sont optimisés par processus itératif. Il existe deux moyens de parvenir à caler ces paramètres : (1) manuellement par essai et erreur et (2) avec l'aide d'un logiciel qui peut faire l'estimation des paramètres de manière automatique (PEST ou MODFLOWP). En pratique, la première méthode reste la plus utilisée, probablement à cause de la complexité de mettre en œuvre la structure automatique.

8.2.1 Méthode d'essai et erreur et définition des conditions initiales

La méthode de calage par essai et erreur comporte l'intégration de points d'observation. Les résultats des simulations sont comparés et analysés par rapport aux valeurs des niveaux d'eau mesurées sur le terrain. Si la marge d'erreur des résultats simulés est acceptable[1], le modèle est considéré comme étant calé. Toutefois, si le niveau d'erreur est considéré comme inacceptable, les valeurs des paramètres sont réévaluées et le modèle est relancé jusqu'à l'obtention de résultats acceptables.

La première étape consiste à fournir au modèle des conditions initiales. D'après l'expérience professionnelle de Daniel Paradis (CGC) avec le modèle MODFLOW, il était suggéré de faire une simulation transitoire sur dix ans avec les mêmes paramètres pour obtenir des valeurs stables semblables à celles d'une simulation en régime permanent. Après dix ans de simulation, le modèle atteint un certain équilibre et par la suite il est possible de rajouter 24 périodes de stress d'une longueur d'un mois chacune pour continuer la simulation.

Il faut comprendre que seulement deux possibilités de modification des paramètres s'offrent à nous, soit : les propriétés hydrauliques et le niveau piézométrique initial. Pour les propriétés des matériaux, la première partie de la simulation (celle sur dix ans) a été lancée avec des valeurs de conductivité provenant de la littérature et comparées à l'analyse de sensibilité (tableaux 8.1 et 8.2). Ces simulations ont été effectuées en régime transitoire avec une donnée de recharge de 0,015 mm/jour, valeur qui tend à représenter des données moyennes journalière pour une année complète. En ce qui concerne le niveau de l'eau par rapport au sol, une valeur moyenne de 2 m a été utilisée.

[1] Le niveau d'erreur commis par le modèle est déterminé par l'usager. Dans notre cas, l'intervalle d'erreur est de 2 m et l'intervalle de confiance est fixé à 90 %.

Tableau 8.2 : Valeurs fournies au modèle après calage et analyse de sensibilité.

Numéro GMS	Matériaux géologiques	Conductivité hydraulique horizontale	Conductivité hydraulique verticale	Anisotropie horizontale	Anisotropie verticale	Emmagasinement spécifique	Porosité
		m/jour	m/jour		Kh/Kv	1/m	
#2	Till de Lennoxville	0.864	0.864	1	1	0.001	0.3
#3	Sédiments fluviaux glaciaires	0.864	0.864	1	1	0.001	0.5
#7	Alluvions récentes	0.864	0.864	1	1	0.01	0.5
#11	Roche en place	0.432	0.0432	1	10	0.0001	0.05
#12	Roche en place	0.0864	0.00864	1	10	0.0001	0.05
#13	Roche en place	0.00864	0.000864	1	10	0.0001	0.05

Après avoir effectué une modélisation sur dix ans, nous avons utilisé comme valeurs initiales les valeurs simulées par le modèle pour effectuer le reste des simulations transitoires sur 24 mois et les valeurs de recharge provenant d'HYDROTEL.

8.3 Évaluation des simulations

Grâce à un rendu visuel présentant des cibles de calage (figure 8.1) ainsi que des comparaisons des valeurs simulées par rapport à celles mesurées, il nous a été plus facile de pouvoir réajuster les valeurs présentées au tableau 8.2. De plus, il faut savoir que nous avons dû accomplir plus d'une centaine de simulations, variant entre 5 et 50 itérations par pas de temps, pour arriver à un résultat considéré comme acceptable de notre part.

Il est intéressant de noter que les valeurs simulées dans la partie nord-est du bassin (figure 8.1) correspondent aux erreurs maximums sur l'ensemble du bassin. La pente très élevée de cette région et le manque de données mesurées peuvent avoir jouer un rôle important sur cette réponse.

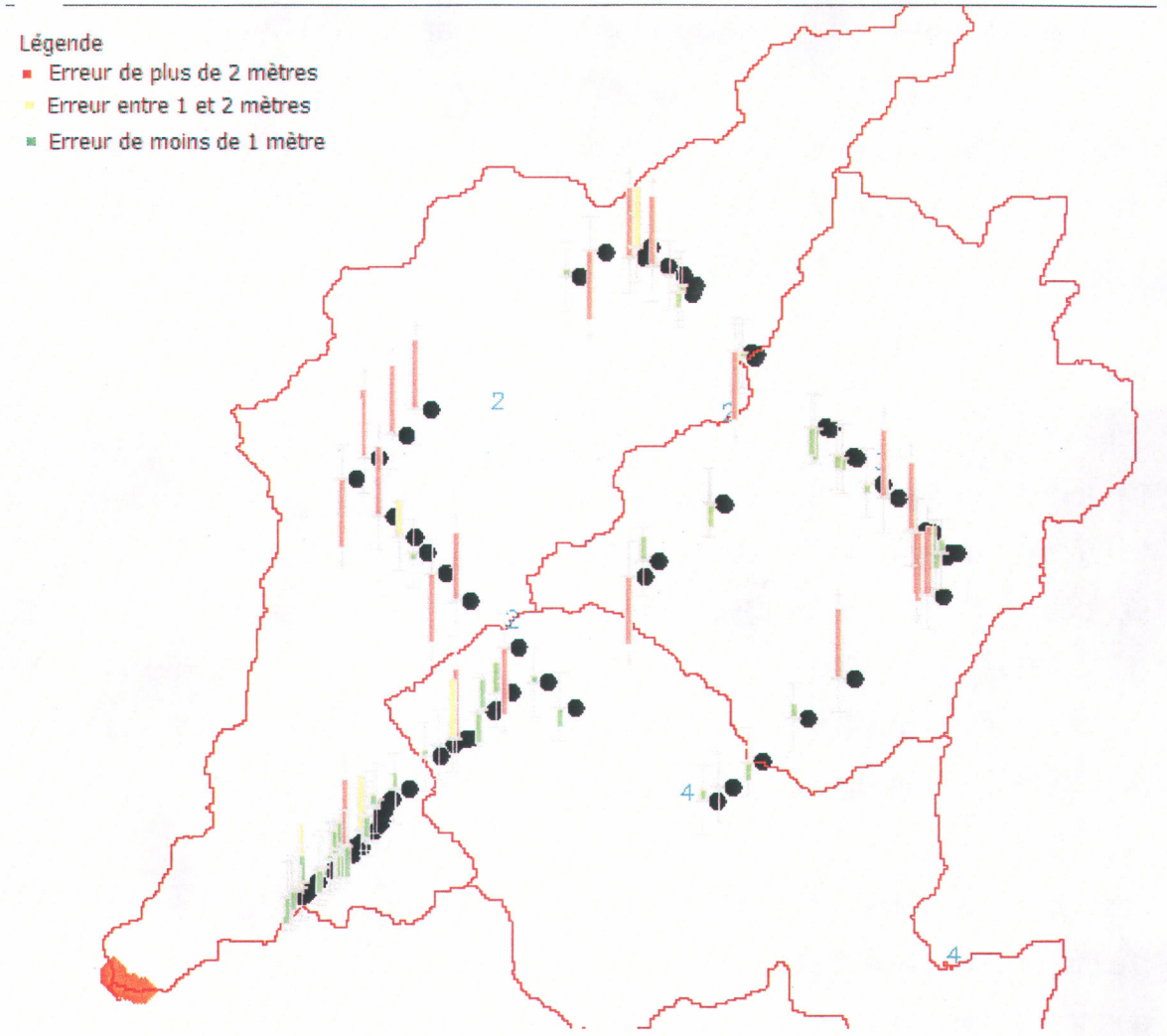


Figure 8.1: Cibles de calage des niveaux piézométriques calculés par rapport aux niveaux piézométriques mesurés. 68 points de contrôle pris le 19 novembre 2003 et le 31 mars 2004.

8.3.1 Comparaison du débit de base calculé par HYDROTEL et MODFLOW

Une autre façon de valider la méthode est d'utiliser des données d'infiltration d'HYDROTEL comme données de recharge pour MODFLOW et de vérifier si le débit de base calculé par HYDROTEL et par MODFLOW se situe dans le même ordre de grandeur et varie de la même façon. Pour ce faire, nous avons utilisé les données à l'exutoire du bassin.

La donnée correspondant au débit de base dans HYDROTEL est représentée par le Q_3 (m^3/s avec un pas de temps 3 h) de la figure 2.2. Pour extraire la donnée du débit de base de MODFLOW, il a fallu utiliser le bilan hydrique détaillé (MODFLOW-2000a). De plus, nous avons dû sélectionner l'ensemble des cellules du réseau hydrographique pour avoir les données à l'exutoire. Ces données sont présentées au tableau 8.3.

Les valeurs mesurées du débit en rivière nous ont été transmises par le Centre d'expertise hydrique du Québec avec un pas de temps journalier (en m^3/s). Ces données proviennent de la station hydrométrique Famine située à 7 km en amont de la rivière Chaudière. Une moyenne sur l'ensemble des données pour chaque mois a été réalisée et par la suite convertie en m^3/jour (tableau 8.3).

Tableau 8.3. : Données du débit de base (MODFLOW et HYDROTEL), de la lame d'eau et du débit en rivière à l'exutoire.

Date	MODFLOW		HYDROTEL		Station Famine
	Débit de base calculé (m^3/jour)	Lame d'eau simulée (mm/mois)	Débit de base calculé (m^3/jour)	Lame d'eau simulée (mm/mois)	Débit en rivière observé (m^3/jour)
juil-2002	86230	3,55	80181	3,30	2999203
août-2002	93632	3,86	73245	3,02	86141
sept-2002	25917	1,07	66781	2,75	89078
oct-2002	95420	3,93	73485	3,03	333504
nov-2002	63848	2,63	79069	3,26	667872
déc-2002	41837	1,72	80051	3,30	619747
janv-2003	18825	0,78	79315	3,27	464227
févr-2003	10032	0,41	76775	3,16	147658
mars-2003	11055	0,46	75919	3,13	1655770
avr-2003	57305	2,36	81262	3,35	3844800
mai-2003	38465	1,59	80092	3,30	2122762
juin-2003	55898	2,30	79451	3,27	1259453
juil-2003	51529	2,12	78572	3,24	1408234
août-2003	118017	4,86	79088	3,26	1177286
sept-2003	66793	2,75	73136	3,01	86573
oct-2003	32613	1,34	73822	3,04	1012176
nov-2003	86043	3,55	81133	3,34	2239574
déc-2003	28036	1,16	81254	3,35	1472774
janv-2004	18965	0,78	79961	3,30	316915
févr-2004	5419	0,22	77440	3,19	106013
mars-2004	6103	0,25	75559	3,11	660960
avr-2004	55448	2,28	81154	3,34	3884458
mai-2004	36071	1,49	80403	3,31	1775434
juin-2004	71663	2,95	80358	3,31	1038528

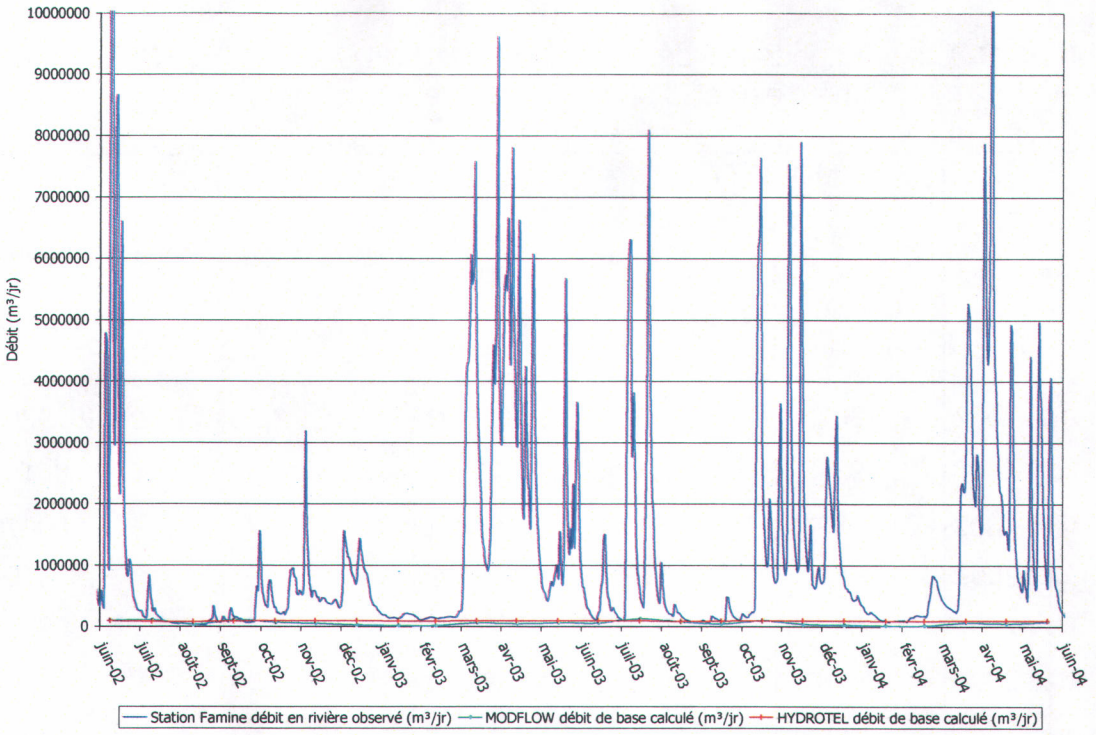


Figure 8.2 : Débits journaliers observés à la station Famine, débits de base calculés par HYDROTEL et MODFLOW (m³/j) pour la période juin 2002 à juin 2004

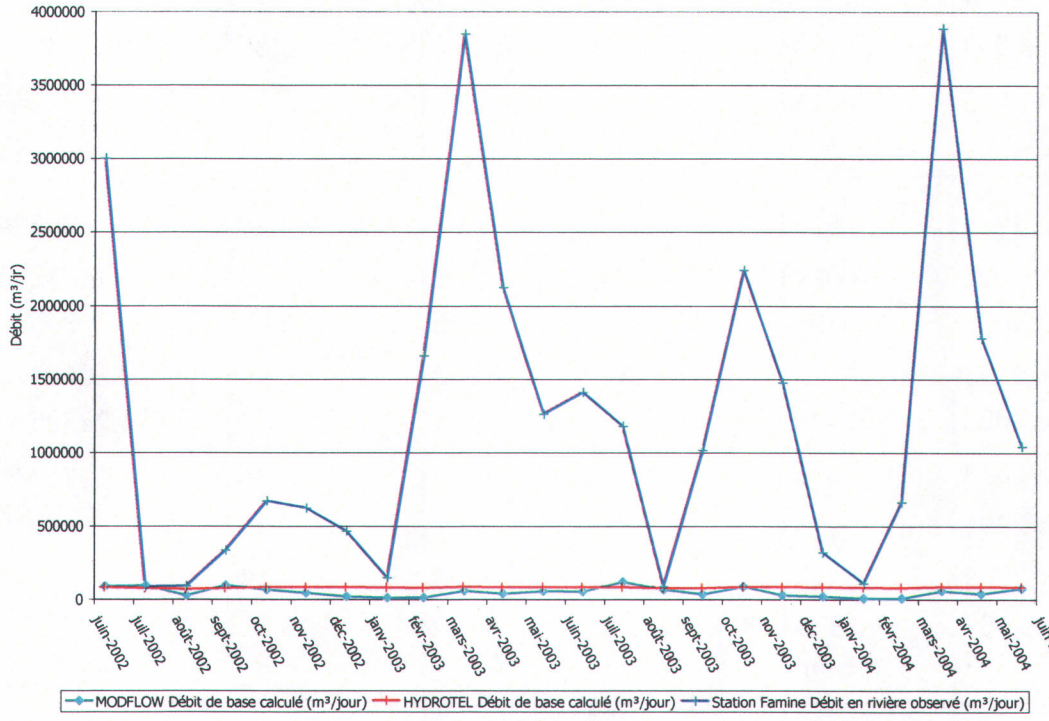


Figure 8.3 : Débits moyens mensuels observés à la station Famine, débits de base calculés par HYDROTEL et MODFLOW (m³/j) pour la période juin 2002 à juin 2004

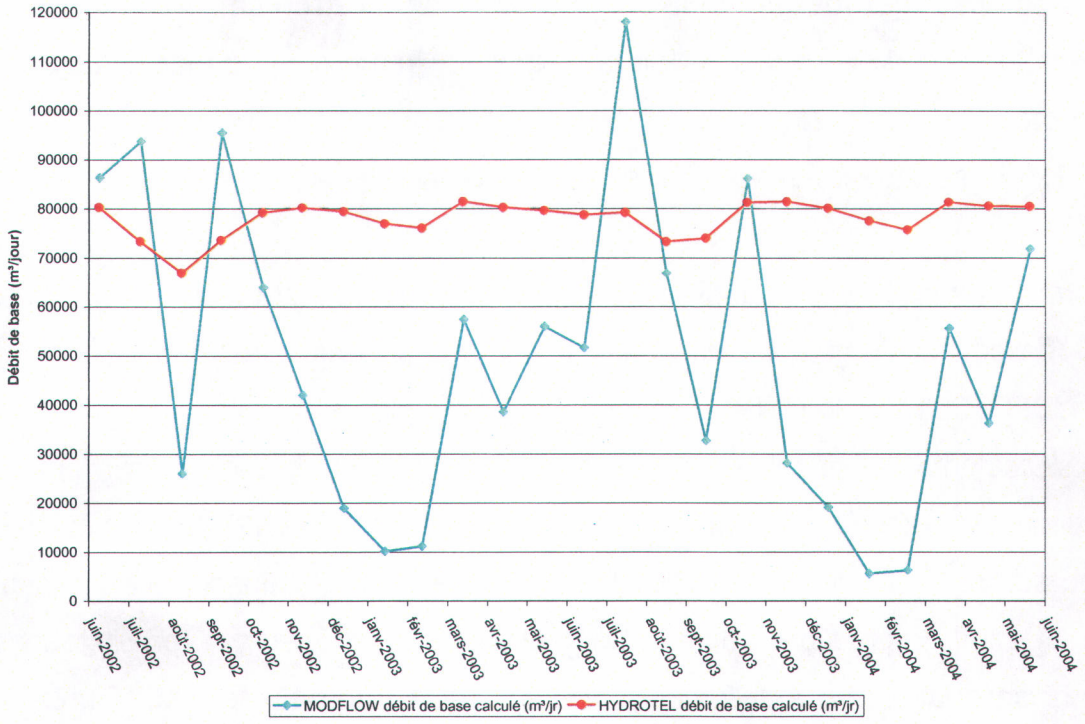


Figure 8.4 : Débits de base calculés par HYDROTEL et MODFLOW (m³/j) pour la période juin 2002 à juin 2004

Lorsque nous regardons en détail la figure 8.2, il est difficile de lier visuellement les différentes valeurs sans tenir compte des échelles de grandeur. Le débit de base est extrêmement plus petit que le débit en rivière et semble presque inexistant sur ce graphique. Toutefois, à la figure 8.3, l'échelle diminue de moitié lorsque les valeurs de débits en rivières sont exprimées par des moyennes mensuelles. Il intéressant de constater une similitude de tendances entre les débits observés en rivières et les débits de base calculés par MODFLOW. Il est impossible de tenter d'expliquer un quelconque lien avec les données simulées par HYDROTEL et celles mesurées car les données simulées semblent rester constantes, peu importe les saisons ou les périodes de crue ou d'étiage. Par exemple, pour les mois de septembre 2002, février 2003, septembre 2003 et février 2004, nous observons des minimums pour les débits en rivières ainsi que pour les débits de base calculés par MODFLOW. Cette tendance similaire reflète que MODFLOW est en mesure de représenter, avec une certaine limite, des données observées. Dans une prochaine étude il serait utile de faire une analyse

de séparation des débits de base pour pouvoir mieux comparer les débits observés et les débits simulés. Par contre, il est intéressant et même rassurant de noter que les valeurs de débits de base calculées par MODFLOW et HYDROTEL se situent dans le même ordre de grandeur.

D'après la figure 8.4, les valeurs provenant d'HYDROTEL restent quasi constantes sur l'ensemble de la période. En ce moment-ci, tout nous porte à croire qu'HYDROTEL régit son bilan vertical à l'aide de couches de sols interconnectées qui s'écoulent seulement sur deux faces. De plus, à cause de sa hauteur relativement petite (1,75 m), la troisième couche se trouve en contenu maximum d'eau atteint, et la majeure partie du temps, elle est à sa capacité maximale de décharge. L'interaction avec les éléments extérieurs (précipitations, évapotranspiration, ruissellement, etc.) du système se fait presque essentiellement avec les deux premières couches. Pour de plus amples détails sur le calage d'HYDROTEL, voir l'article de FORTIN *et al.* (2001b).

Toutefois, lorsqu'on regarde les données du débit de base provenant de MODFLOW, nous remarquons une différence importante entre les mois où la recharge (voir tableau 6.1 : Les données d'infiltration) est faible ou nulle. En effet, l'interaction de la première couche, le transfert d'écoulement par six faces ainsi que les degrés de liberté très élevés du modèle conceptuel (stratigraphie, paramètres définis à chaque matériau, modèle régional de 300 m de profondeur) font en sorte que la quantité d'eau se retrouvant dans la rivière est variable. La figure 8.5 démontre bien que la zone de contact de la rivière est beaucoup plus petite avec le modèle conceptuel de MODFLOW que celui d'HYDROTEL.

D'après les données représentées sur l'ensemble des figures 8.2 - 8.4, il nous semble évident que l'utilisation du modèle hydrogéologique MODFLOW semble mieux décrire le système régional d'écoulement souterrain que le modèle HYDROTEL.

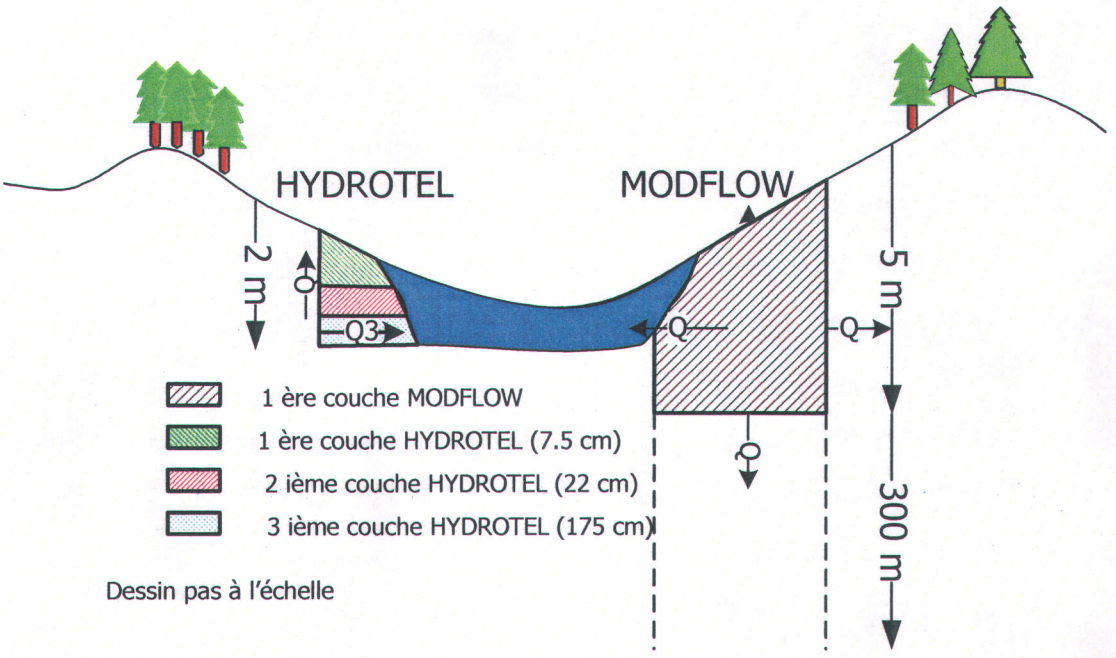


Figure 8.5 : Écoulement simulé par HYDROTEL et MODFLOW.

8.4 Résultats des simulations

Les résultats présentés sont l'aboutissement d'un calage minutieux où plusieurs paramètres jouent un rôle relativement influent sur les réponses simulées par le modèle, comme l'indique l'analyse de sensibilité en début de chapitre. La simulation optimale présente des résultats vraisemblablement intéressants. En effet, l'erreur moyenne des hauteurs piézométriques simulées par rapport à celles mesurées est de 1,99 m, l'erreur moyenne absolue est de 2,71 m et l'erreur quadratique moyenne est de 5,74 m. Les erreurs sont simulées pour les 68 points de contrôle. Prenant en compte les erreurs possibles lors de la prise de mesures, c'est-à-dire pouvant provenir des instruments de mesure, de la méthode de géoréférencement par carte sans l'aide de GPS et du fait que le modèle fut construit sous une échelle régionale, nous considérons cette erreur comme étant très acceptable.

Toutefois, même si nous sommes assez satisfaits des résultats, lorsqu'on regarde attentivement la distribution spatiale des données simulées par rapport à celles

mesurées (voir figure 8.6), il est intéressant de noter que les réponses se retrouvent souvent, soit au même niveau, ou soit au-dessus des valeurs mesurées. Seulement 27 % des points se retrouvent en dessous de la ligne des données mesurées. D'après nous, cette erreur récurrente serait vraisemblablement engendrée par le niveau piézométrique initial. À vrai dire, nous devons le surestimer pour permettre à la première couche du modèle de ne pas être desséchée dès les premières périodes de stress de la simulation, car le code de MODFLOW ne permet pas une réhumidification des cellules. La présence nombreuse d'affleurements rocheux et de till sur la première couche fait en sorte que le modèle a plus de difficulté à drainer l'eau vers les couches inférieures. Il a fallu choisir une des deux options suivantes, soit : une meilleure erreur moyenne avec la première couche desséchée, ou bien une erreur moyenne moins bonne avec des cellules inondées. Nous avons décidé d'avoir une erreur moyenne un peu moins bonne mais de pouvoir entreprendre d'autres simulations de transport fournies par le logiciel, chose que nous n'aurions pas pu faire si la première couche avait été desséchée. Une autre hypothèse peut expliquer un écart entre les valeurs simulées et celles mesurées. Nous croyons que les données d'infiltration provenant d'HYDROTEL sont un peu au-dessus de la réalité. En effet, étant donné les données cumulatives des précipitations de 918 mm en 2002-2003 et 1188 mm pour 2003-2004, il est peu probable que la moitié se retrouve selon le bilan hydrique en infiltration (403 mm pour 2002-2003 et 422 mm pour 2003-2004). Il est bien entendu que chaque territoire comporte des caractéristiques spécifiques pouvant influencer le taux de recharge, soit positivement ou négativement. Sur la Famine, nous croyons que les paramètres du système auraient tendance à influencer négativement le taux de recharge, dû à la géologie composée majoritairement de till et de rock (matériau imperméable) et par la présence de forêt (71 % du territoire) influençant considérablement le taux d'évapo(transpi)ration.

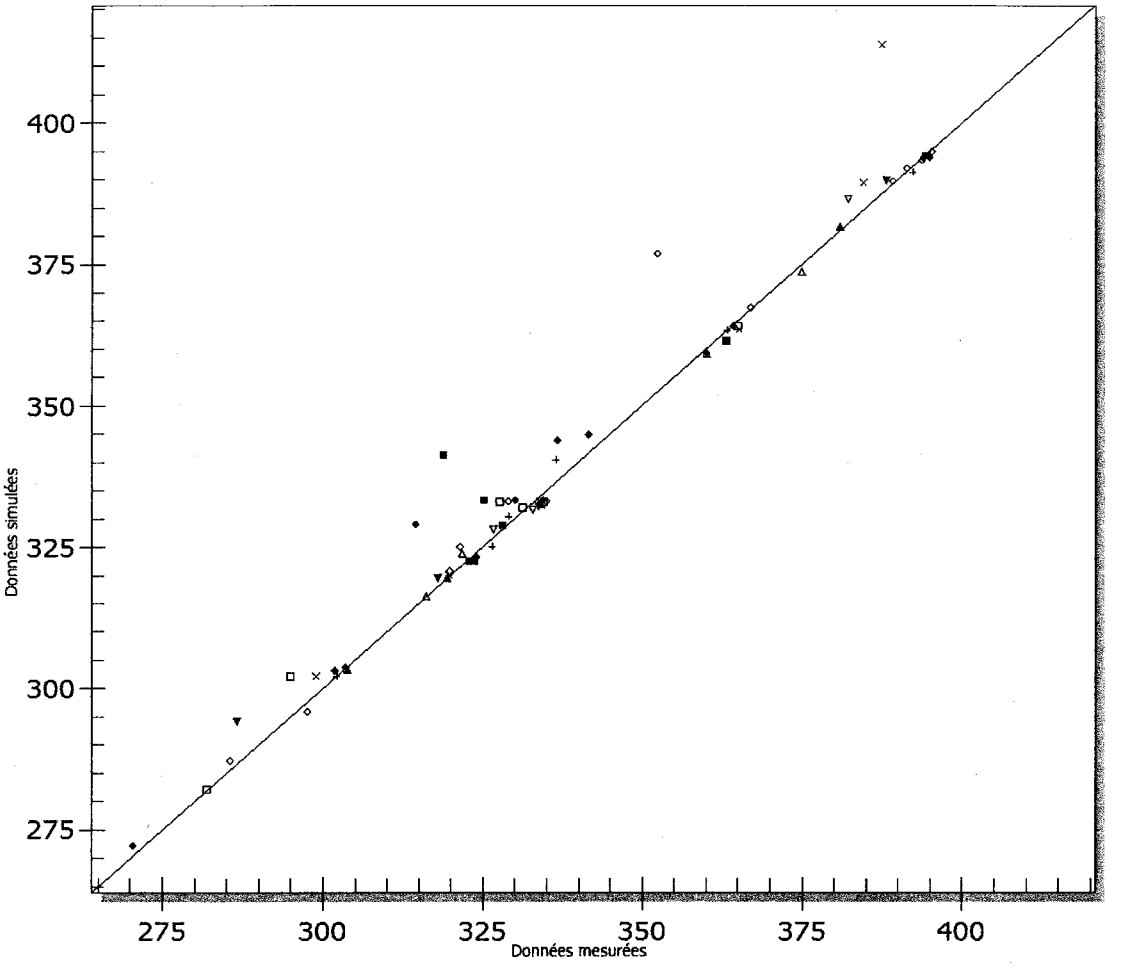


Figure 8.6 : Comparatifs des données simulées par rapport aux données mesurées sur la première couche du modèle.

Une autre façon de présenter les résultats est d'illustrer les valeurs résiduelles par rapport aux données mesurées (voir figure 8.7). Il est intéressant de noter que 46 % des données (29 sur 68) se retrouvent dans l'intervalle ±1 m. De plus, 72 % (49 sur 68) des données se retrouvent dans l'intervalle de l'erreur moyenne de 2,0 m. De plus, seulement 7 % (5 sur 68) des données représentent une valeur plus grande que celles mesurées sur le terrain. En effet la valeur piézométrique la plus basse mesurée sur le terrain est de -10,4 m et seulement quatre valeurs se trouvent plus basses que cette donnée.

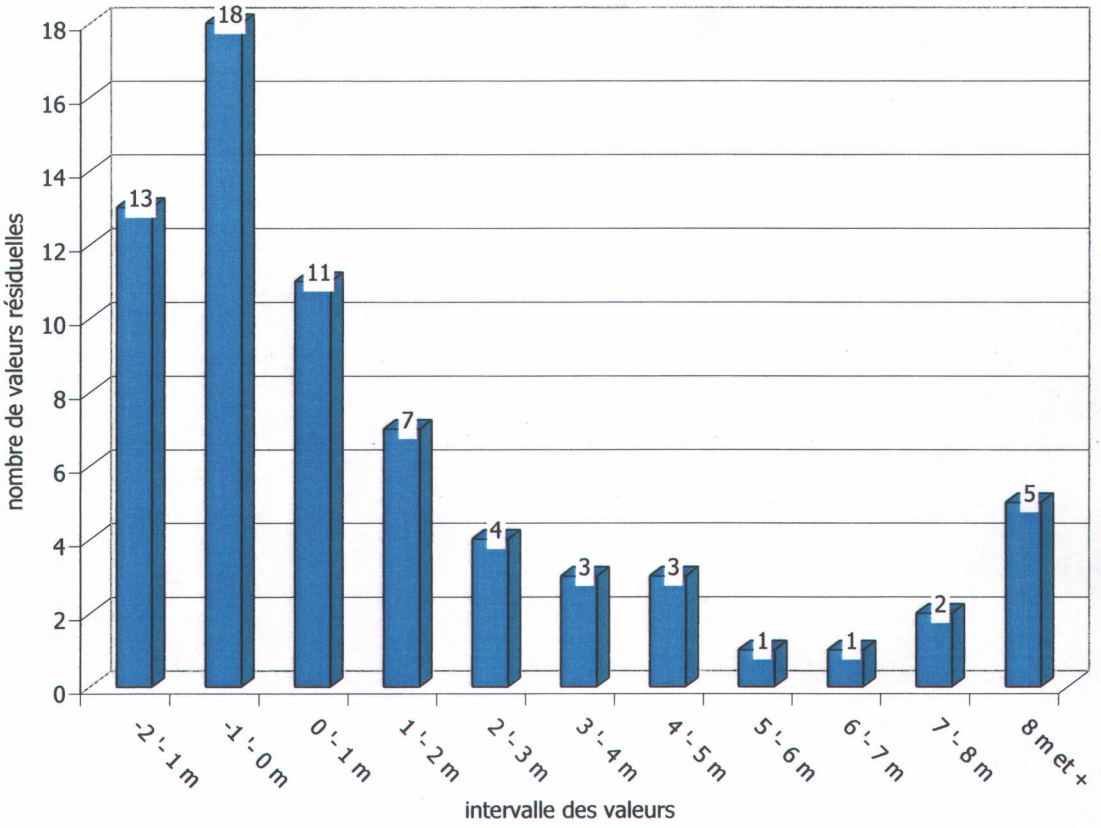


Figure 8.7 : Histogramme des valeurs résiduelles des 68 points de contrôle.

8.5 Conclusion

Nous avons effectué une étude de sensibilité sur 8 des 52 entrées nécessaires au modèle. Les paramètres ont été modifiés par des facteurs multiplicatifs de 10 et 0,1 par rapport aux valeurs calées. Pour la conductivité hydraulique, nous avons remarqué que plus l'épaisseur et le volume des matériaux sont importants, plus les conséquences d'un changement sont remarquables. Le paramètre le plus influent est le niveau piézométrique initial. En effet, une différence de 2 m sur la valeur optimale fait varier de plus de trois fois l'erreur moyenne.

Nous avons utilisé la méthode d'essai et erreur pour caler le modèle. Nous avons simulé sur 25 périodes de stress, soit une période de dix ans avec les mêmes paramètres pour obtenir des valeurs stables semblables à celles d'une simulation en régime permanent et 24 autres périodes d'un mois avec des paramètres différents.

Pour évaluer les simulations, nous avons eu recours à un rendu visuel présentant des cibles de calage (figure 8.3) ainsi que des comparaisons des valeurs simulées par rapport à celles mesurées. De plus, les valeurs du débit de base simulé par les deux modèles ont été comparées par rapport au débit en rivière de la station Famine. Les réponses sont variables mais restent dans le même ordre de grandeur.

Enfin, les résultats de la simulation optimale présentent une erreur moyenne de 2,0 m, une erreur moyenne absolu de 2,71 m et une erreur quadratique moyenne de 5,74 m sur les hauteurs piézométriques simulées par rapport à celles mesurées. Il est intéressant de noter que 46 % des données se retrouvent dans l'intervalle ±1 m. De plus, 72 % des données se retrouvent dans l'intervalle de l'erreur moyenne.

9.0 Conclusion et recommandations

Nous avons réussi à établir une procédure pour mettre en place la conceptualisation d'un modèle hydrogéologique (MODFLOW) dans le cadre d'une éventuelle mise en place dans GIBSI. En effet, à l'aide de données générées par un modèle hydrologique (HYDROTEL), nous pouvons établir un bilan hydrique, déterminer les unités hydrostratigraphiques à partir des bases de données et utiliser le système d'écoulement provenant de GIBSI. En d'autres mots, ces trois étapes cruciales à la conceptualisation du modèle sont réalisées en amont par des sources extérieures.

Cette étude a été réalisée sur le bassin versant de la Famine, sous-bassin versant de la Chaudière (6 682 km²). D'une superficie de 728 km², sa géologie est constituée de till, alluvions récentes, sédiments fluvio-glaciaires et roche en place. La qualité de l'eau du bras de la Famine est la plus dégradée de tout le bassin (MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE, 1996). Les cultures dominent au détriment de la forêt, d'où l'intérêt de pouvoir réaliser des scénarios de prédiction avec l'aide du modèle hydrogéologique. Nous sommes maintenant en mesure de visualiser, et surtout de comprendre les répercussions dues à divers changements d'origine naturelle ou anthropique survenant sur le système.

Deux méthodes simples ont été déployées pour valider l'utilisation des données d'infiltration comme données de recharge entre les deux modèles. Premièrement, nous avons comparé une donnée de sortie que les deux modèles sont en mesure de produire. En fait, le débit de base calculé par HYDROTEL et par MODFLOW se situe dans le même ordre de grandeur et varie sensiblement de la même façon. Deuxièmement, en observant les différences du niveau piézométrique par rapport aux valeurs observées sur le terrain et celles calculées par le modèle

hydrogéologique, nous obtenons une erreur moyenne de 1,99 m par rapport à une profondeur totale de 300 m.

Nous avons utilisé l'approche essai et erreur pour caler le modèle, en commençant à introduire des valeurs initiales (conductivité hydraulique, niveau piézométrique, porosité) en régime transitoire avec deux périodes de stress (10 ans et 2 ans). Seulement 27 % des points se retrouvent en dessous de la ligne des données mesurées, 46 % des données se retrouvent dans l'intervalle ±1 m. Aussi, 72 % des données se retrouvent dans l'intervalle de l'erreur moyenne de 2,0 m et seulement 7 % des données représentent une valeur plus grande que celles mesurées sur le terrain.

9.1 Possibilités futures

La conceptualisation d'un tel modèle a pour but d'évaluer la faisabilité d'utiliser des données calculées par un modèle pour les introduire comme données d'entrée à un autre. Ceci dit, nous croyons avoir accompli cette mission avec succès. C'est pourquoi il est intéressant de pouvoir utiliser ces travaux ou bien cette procédure à d'autres fins, pour ainsi mettre au point un système de prédiction informatique des écoulements, de la qualité, de la quantité, de la vitesse et du volume de l'eau souterraine. Lorsque le modèle est calé et supporté par une base de données, il est facile d'ajouter des modules donnant accès à d'autres sortes de prédiction telles que le traçage de particules (module MT3DMS dans GMS), scénarios de changements climatiques, et définir les zones de captage pour les puits. Voici un résumé des technologies qui peuvent être utilisées sans plus d'effort requis de notre part.

Traçage des particules

Le traçage des particules est utilisé pour délimiter le chemin de sortie du débit en traçant le mouvement d'une particule infiniment petite placée dans le champ d'écoulement. Ce logiciel est utilisé à la suite et en partenariat avec MODFLOW et utilise les données pour calculer la vitesse de distribution. Le traçage de particules est utilisé en général pour :

1. Obtenir une représentation visuelle de la direction des zones d'écoulement
2. Tracer le chemin de contaminants
3. Détecter les erreurs conceptuelles qui ne peuvent être détectées en faisant l'examen de la distribution du niveau de l'eau.

9.2 Recommandations

Données de terrain

La prise des niveaux piézométriques sur le terrain devrait être effectuée à chaque mois, sur une période de deux ans, et ce sur les mêmes puits. De plus, une bonne répartition spatiale devrait être respectée avec un minimum de 50 puits pour l'ampleur de ce bassin. Dû à la variabilité climatique, il est difficile de caler correctement un modèle si les valeurs ont été prélevées uniquement durant une seule saison. L'utilisation d'un GPS est conseillée pour une plus grande précision lors du géoréférencement des puits dans le modèle.

Matériaux

Il apparaît primordial de faire des tests de conductivité hydraulique sur le terrain. Les valeurs présentes dans la littérature sont des valeurs moyennes et n'indiquent pas nécessairement la réalité de terrain. Dans notre cas, le problème

fut engendré par le till. Celui-ci démontre généralement une conductivité hydraulique très variable, rendant complexe le calage du modèle.

Un autre point important à relever est d'utiliser le moins de matériau possible. MODFLOW gère très mal les couches inférieures à 2 m d'épaisseur. Idéalement, il est conseillé aussi d'éviter les grandes variations d'altitude ou de rajouter des couches intermédiaires.

Travail sur le modèle

GMS est un programme très gourmand en ressources, il faut donc un ordinateur très puissant pour obtenir des temps de simulation respectables, mais aussi pour pouvoir donner autant de détails et de profondeur au modèle qu'on le souhaite. À titre d'information, nous avons travaillé avec un Pentium 4 3,0 GHz, 2 Go de mémoire vive ainsi que 120 Go d'espace disque. Le temps moyen d'une simulation d'une période de 24 mois avec cinq itérations par période est de 35 minutes. Les fichiers de sortie varient entre 1 et 20 Go selon les informations utilisées.

Dans ce projet, nous avons représenté l'intégralité du sous-bassin de la Famine. Ceci nous a forcés à travailler avec un nombre énorme de cellules car nous avons voulu garder la même grandeur de cellules de mailles (100 m par 100 m) utilisée par HYDROTEL. Le traitement des données était tellement lourd que seulement une partie des options de sortie pouvait être activée. Il fallait donc faire des choix ou produire plusieurs simulations pour obtenir toutes les informations voulues. Il nous parait évident, dans l'avenir, de faire des projets sur des bassins de plus petite superficie.

L'étape de calage du modèle est un exercice critique dans la conception du modèle. Il est primordial d'investir beaucoup de temps pour avoir des résultats

optimaux. GMS permet de connaître l'erreur moyenne de notre simulation en fonction de nos points d'observation. Obtenir une erreur moyenne de zéro nous assure la validité du modèle.

10.0 Liste des référence

ABBOTT, M.B., BATHURST, J.C.; CUNGE, J.A.; OCONNELL, P.E.; RASMUSSEN, J., 1986. An introduction to the European hydrological system – system hydrologique européen, SHE 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling. Journal of Hydrology, Vol. 87(1-2), pp. 45-59

ABBOTT, M.B., BATHURST, J.C.; CUNGE, J.A.; OCONNELL, P.E.; RASMUSSEN, J., 1986. An introduction to the European hydrological system – system hydrologique européen, SHE 2: Stucture of a physically-based distributed modelling system Journal of Hydrology, Vol. 87(1-2), pp. 61-77

ANDERSON, M.P. et WOESSNER, W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling, Simulation of flow and advective transport. *Academic Press*, 381 p.

BAPE (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement). 2000. L'eau, ressource à protéger, à partager et à mettre en valeur. Rapport de la Commission sur la gestion de l'eau au Québec. N° 142, Tome I. 478 p.

BEVEN, K.J., 1989. Unsatured flow in hydrologic modeling: theory and practice. Éditeur: H. J. Morel-Seytoux. 531 p.

BEVEN, K.J. et KIRBY M.J. 1979. A Physically-based variable contributing area model of catchment hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1) :43-69

BLAIS, A., et SHILTS W.W., 1992. Surficial geology, Beauceville (12 L/2), and Saint-Joseph-de-Beauce (21 I/7), Québec; Geological Survey of Canada, Open File 2537.

BRAZEAU A., 1998 a. Inventaire des ressources en granulats de la région de Saint-Joseph-de-Bauce (21L/07). Ministère des Ressources naturelles, secteur des mines. MB 97-21, 33 p., 1 carte.

BRAZEAU A., 1998 b. Inventaire des ressources en granulats de la région de Beauceville – Saint-Zacharie (21L/01 et 21l/02). Ministère des Ressources naturelles, secteur des mines. MB 97-16, 29 p., 2 cartes.

CLAPP, R.B. et HORNBERGER, G.M., 1978. Empirical equations for some hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 14(4), 601-604.

COUSINEAU, P.A., COSETTE, D., MARQUIS, R. 1983. L'Ordovicien entre Saint-George et Lac Etchemin. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. DP 84-08, 1 carte échelle 1 :50000.

COUSINEAU, P.A. 1990. Le groupe de Caldwhell et le domaine océanique entre Saint-Joseph-de-Bauce et Sainte-Sabine. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. MM 87-02, 178 p., 3 cartes échelle 1 :50000.

DIERSCH, H.-J. G 2002. FEFLOW Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System. Wasy Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd. Berlin, Germany.

DINGMAN, S.L., 2002. Physical hydrology, second edition. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 646 p.

DOMENICO,P. A. et SCHWARTZ, F. W, 1998 Physical and Chemical *Hydrogeology*, second edition Wiley, 506 p.

FORTIN, J.-P., R. TURCOTTE, S. MASSICOTTE, R. MOUSSA, J. FITZBACK et J.-P. VILLENEUVE, 2001 a. Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. II: Application to Chaudière Watershed. *J. Hydrol. Eng. - ASCE* 6 (2): 100-108.

FORTIN, J.-P., R. TURCOTTE, S. MASSICOTTE, R. MOUSSA, J. FITZBACK et J.-P. VILLENEUVE, 2001 b. Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model. *J. Hydrol. Eng. ASCE* 6 (2): 91-99.

FRANCHINI, M, WENDLING, J, OBLED, C and TODINI, E., 1996. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *J. Hydrology*, 175, 293-338.

Gouvernement du Québec, 1997. Symposium sur la gestion de l'eau au Québec. Document de référence. Ministère du Conseil exécutif. 59 p.

Gouvernement du Québec, 2001. Règlement sur la qualité de l'eau potable. Ministère de l'environnement.

HILL, M.C., 1992. A computer program (MODFLOWP) for estimating parameters of a transient, three-dimensional, ground-water flow model using nonlinear regression: U.S. Geological Survey Open-File Report 91-484, 358 p.

LASALLE, P. MARTINEAU, G. CHAUVIN, L., 1976. Géologie des sédiments meubles d'une partie de la Beauce et du Bas-Saint-Laurent. Ministère des Richesses naturelles du Québec. DPV-438, 13 p. 2 cartes.

LAVIGNE, M.-P., ROUSSEAU, A.N., TURCOTTE, R., LAROCHE, M, VILLENEUVE, J.-P., 2004. Validation and use of a semi-distributed hydrological modeling

system to predict short term effects of clear cutting on the hydrological regime of a watershed. *Earth Interactions*, 8(3):1-19.

LERNER, D.N., 1997. Groundwater recharge. In: Saether OM, de Caritat P (eds) Geochemical processes, weathering and groundwater recharge catchments. AA Balkema, Rotterdam 109-150

LERNER, D.N., ISSAR, A.S. et SIMMER, I. 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. IAH Int. Contrib. Hydrogeol 8. Heinz Heise, Hannover, 345 p.

MAHRT, L. et PAN, H., 1984. A two-layer model of soil hydrology. *Boundary-Layer Meteorology*, 29, 1-20.

MCCUEN, R.H. 1973. The role of sensitivity analysis in hydrology modeling. *Journal of Hydrology*, 18. 37-53.

MAILHOT, A., ROUSSEAU, A.N., SALVANO, E., TURCOTTE, R., VILLENEUVE, J.-P., 2002. Évaluation de l'impact de l'assainissement urbain sur la qualité des eaux du bassin versant de la rivière Chaudière à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI. *Revue des Sciences de l'Eau*, **15**(spécial) : 149-172.

MCDONALD, M.G. et HARBAUGH, A.W., 1988. A modular 3D finite-difference groundwater flow model. USGS TWRI.

Ministère de l'Environnement du Québec. (2002). Politique nationale de l'eau : l'eau, la vie, http://www.MENV.gouv.qc.ca/publications/2002/ENV20020310.htm;

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE, 1996. Le bassin de la rivière Chaudière : l'état de l'écosystème aquatique, Québec, Direction des écosystèmes aquatiques, envirodoq n° EN980022.

MOORE, J.E. 1979. Contributions of ground-water modeling to planning. *Journal of Hydrology* 43, 121-128.

MORIN, G. ET PAQUET, P. 1995. Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU, guide de l'utilisateur, version 2,0 pour windows. Rapport N° 435. INRS-Eau, Sainte-Foy, Qué. 54 p.

NASTEV, M., SAVARD, M. M., LAPCEVIC, P., LEFEBVRE, R.,et MARTEL, R. 2004. Hydraulic properties and scale effects investigation in regional rock aquifers, southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeol. J.* 12 (3), 257-269.

REEVES, M., WARD, D.S., JOHNS, N.D. et CRANWELL, R.M., 1986(a). Theory and implementation for SWIFT II, the Sandia waste-isolation flow and transport model for fractured media, release 4.84. Report SAND83-1159, Sandia Natl.Lab., Albuquerque, N.M.

REEVES, M., WARD, D.S., JOHNS, N.D. et CRANWELL, R.M., 1986(b). Data input guide for SWIFT II, the Sandia waste-isolation flow and transport model for fractured media, release 4.84. Report SAND83-0242, Sandia Natl. Lab., Albuquerque, N.M.

RILEY, J. P., ISRAELSEN, E. K., EGGLESTON, K. O. 1972. Some approaches to snowmelt prediction. Actes du Colloque de Banff sur le Rôle de la Neige et de la Glace en Hydrologie, *AISH*, 2(107), 956–971.

ROUSSEAU, A.N., MAILHOT, A. et VILLENEUVE, J.-P., 2000. La gestion intégrée de l'eau par bassin versant : Problématique, éléments de solution et exemples

d'application du système informatisé GIBSI. *Vecteur environnement*, vol. 33, N° 5, pp. 27-30, 51-54.

ROUSSEAU, A.N., MAILHOT, A. et VILLENEUVE, J.-P., 2002. Development of a risk-based TMDL assessment approach using the integrated modelling system GIBSI. *Water Science & Technology*, 45(9): 317-324.

SALVANO, E., ROUSSEAU, A.N., DEBAILLEUL, G., VILLENEUVE, J.-P., 2004. Development of a cost-benefit framework to evaluate the impact of legislation supporting reduction of agricultural pollution at the watershed level. Éditeurs Manley TO, PL Manley, T Mihuc, Lake Champlain: Partnerships and Research in the New Millenium, Kluwer Academic/Plenum Publishers: 123-142.

SLIVITZKY, A. et ST-JULIEN, P. 1987. Compilation Géologique de la région l'Estrie-Beauce. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. MM 85-04, 51 p.

SOPHOCLEUS, M.A., 2002. Interactions between groundwater and surface water: The state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10(1):52-67.

SOUZA, W,R., 1987. Documentation of a graphical display program for the saturated-unsaturated transport (SUTRA) finite-element simulation model. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4245, 122 p.

TURCOTTE, R., FORTIN, J.-P., ROUSSEAU, A.N., MASSICOTTE, S., VILLENEUVE, J.-P. 2001. Determination of a the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 240:225-242.

TURCOTTE, R., LACOMBE, P., DIMNIK, C., VILLENEUVE, J.-P. AGU 2004. Prévision hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec structure. *Can. J. Civ. Eng.* **31**:308-320.

TURCOTTE, R., ROUSSEAU, A.N., FORTIN, J.-P., VILLENEUVE, J.-P. 2003. Development of a process-oriented, multiple-objective, hydrological calibration strategy accounting for model structure . *Water Science & Application 6,* Calibration of Watershed Models, AGU, 153-163.

VILLENEUVE, J.-P., ROUSSEAU, A.N., LAROCQUE, M., LEFEBVRE, R., MICHAUD, Y., SLIVITZKY, M., TURCOTTE, R., 2002. Étude des processus hydrologiques et hydrogéologiques responsables des conditions d'étiage et de recharge dans les bassins versants du sud du Québec - Étude d'avant-projet. Dans le cadre du projet OURANOS. Rapport de recherche No R-621, 87 p.

VILLENEUVE, J.-P., ROUSSEAU, A.N., MAILHOT, A., HUBERT, P., 1998. La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. *Revue des sciences de l'eau,* N° spécial 10 ^{e} anniversaire, pp. 19-39.

VILLENEUVE, J.-P., BLANCHETTE, C., DUCHEMIN, M., ETONG, N., MAHEU, D., MAILHOT, A., MARTIN, A., ROUSSEAU, AN., ROUX, M., TRÉPANIER, S., TURCOTTE, R. 1998. Rapport synthèse du projet GIBSI : Gestion Intégrée des bassins versant à l'aide d'un système informatisé, Québec, INRS-Eau. R000462-s1.

Annexe A Tableaux récapitulatifs de la Revue de Littérature

Tableau A.1 FEFLOW

Concepteur/distributeur	Code source et interface : vendeurs de logiciels
Modélisation: processus et approche	Type de milieu : poreux Écoulement : milieux non saturé et saturé; densité variable Transfert de chaleur et de polluants
Discrétisation spatiale	Éléments finis; possibilité de raffinement local Représentation bidimensionnelle ou tridimensionnelle
Contexte d'utilisation	Écoulement souterrain Transport de contaminants Intrusion saline Entreposage de déchets nucléaires Décontamination de l'eau souterraine Écoulement sous barrages Recharge des aquifères
Composantes/options (SIG, sous-modèles, etc.)	Interface avec le SIG ARC/Info
Système d'exploitation	Windows ou UNIX

Les tableaux de cette annexe proviennent de : Villeneuve, J.-P., A. N. Rousseau, M. Larocque, R. Lefebvre, Y. Michaud, M. Slivitzky et R. Turcotte. 2002. *Étude des processus hydrologiques et hydrogéologiques responsables des conditions d'étiage et de recharge dans les bassins versants du sud du Québec - Étude d'avant-projet.* Rapport de recherche No. R-621. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Sainte-Foy, PQ.

Tableau A.2 MODFLOW

Concepteur/distributeur	Code source : USGS (domaine public) Interface : vendeurs de logiciels; plusieurs interfaces disponibles
Modélisation : processus et approche	Type de milieu : poreux Écoulement : milieu saturé
Discrétisation spatiale	Différences finies; raffinement sur un ensemble de lignes et de colonnes (pas de télescopage) Paramétrisation par cellules individuelles ou par zones Représentation tridimensionnelle
Contexte d'utilisation	Écoulement souterrain Délimitation de périmètres de protection Études d'impact
Composantes/options (SIG, sous-modèles, etc.)	Calage automatique des paramètres : MODFLOW ou PEST Peut être couplé à différents modèles de simulation du transport (MOC3D, MT3D, MT3DMS, MODPATH, etc.) Différents modules disponibles pour simuler les entrées et sorties
Système d'exploitation	Avec interface : Windows Sans interface (code source) : DOS et UNIX

Tableau A.3 SUTRA

Concepteur/distributeur	Code source : USGS (domaine public) Interface : vendeurs de logiciels
Modélisation : processus et approche	Type de milieu : poreux Écoulement : milieux non saturé et saturé, densité variable Transfert de chaleur et de polluants
Discrétisation spatiale	Éléments finis et différences finies intégrées Représentation bidimensionnelle
Contexte d'utilisation	Performance d'un puits et analyse d'essais de pompage Écoulements non saturé et saturé en présence de densité variable de l'eau Transport de polluants (contamination, restauration, etc.) Transfert de chaleur Intrusion saline
Composantes/options (SIG, sous-modèles, etc.)	Environnement Argus ONE (SIG)
Système d'exploitation	Avec interface : Windows Sans interface (code source) : DOS et UNIX

Tableau A.4 SWIFT

Concepteur/distributeur	Code source Interface : vendeurs de logiciels
Modélisation : processus et approche	Type de milieu : poreux et/ou fracturé Écoulement : milieux non saturé et saturé, densité variable Transfert de chaleur et de polluants
Discrétisation spatiale	Éléments finis Représentation bidimensionnelle ou tridimensionnelle
Contexte d'utilisation	Injection de déchets dangereux Intrusion saline Simulation du transport de polluants issus de déchets dangereux Performance d'un puits et analyse d'essais de pompage
Composantes/options (SIG, sous-modèles, etc.)	Calage automatique des paramètres dans GRASP-INV
Système d'exploitation	Windows et DOS

Annexe B Provenance et description des données utilisées pour la mise en place du modèle (MODFLOW)

L'équation qui régit la transmissivité [L^2/T] dans le programme CAPSPEC est définie par :

$$T = \left(\frac{2.3 * Q}{(4 * \pi * rab)} \right) * \log 10 \left(\frac{2.25 * T * t}{S * r * r} \right)$$

Les paramètres connus et essentiels au bon fonctionnement doivent être :

- S : Coefficient d'emmagasinement (celui suggéré est de 0,0005)
- *r*2* : Diamètre du puits (cm)
- *rab* : Rabattement (m)
- Q : Taux de pompage (l/minute)
- t : Durée de l'essai (heure)

Certains critères doivent être respectés pour pouvoir être admissibles à la comptabilisation des données d'entrée, soit :

- Une durée de pompage supérieure ou égale à deux heures
- L'installation de la crépine doit être obligatoirement dans le roc
- Que (la profondeur totale – le niveau dynamique) / (la profondeur totale – le niveau statique) > 1/3
- Ainsi que le niveau dynamique $\neq$ au niveau statique

Après avoir examiné l'ensemble de nos données, seulement 43 puits sur 68 correspondaient aux critères mentionnés.

Nous avons réalisé une analyse de sensibilité pour le paramètre du coefficient d'emmagasinement. Toutefois, ce paramètre ne semble pas perturber outre mesure les données de sortie (débit, capacité spécifique, transmissivité, conductivité hydraulique).

Nous souhaitons vous rappeler que ces données n'ont pas servi à construire le modèle conceptuel mais seulement à comparer les données utilisées comme conditions initiales provenant de la littérature et de communications personnelles.

Tableau B.1 : Coefficient d'emmagasinement : 0,05

Coefficient d'emmagasinement: 0,05

i	XNAD27	YNAD27	Q (m^3/hr)	Capspec (m^2/s)	T (m^2/s)	K (m/s)
1	398700	5128300	0,00019000	0,00003115	1,50300E-05	5,01000E-06
2	395700	5126400	0,00075833	0,00049890	3,66810E-04	3,42800E-05
3	382900	5111550	0,00037833	0,00004965	2,61200E-05	2,04000E-06
4	388250	5114870	0,00037833	0,00010337	6,13700E-05	2,27300E-05
5	382750	5121200	0,00037833	0,00024728	1,66240E-04	2,86600E-05
6	387250	5113950	0,00037833	0,00007290	4,09400E-05	6,71000E-06
7	382720	5121820	0,00072667	0,00002536	1,34000E-05	2,20000E-06
8	384250	5119600	0,00062833	0,00006444	3,54600E-05	2,38000E-06
9	385000	5121650	0,00037833	0,00013758	8,52700E-05	1,33200E-05
10	387760	5118250	0,00053000	0,00011597	7,00800E-05	4,67200E-05
11	384850	5121700	0,00050000	0,00020492	1,34400E-04	1,47700E-05
12	397100	5141220	0,00037833	0,00012404	7,57100E-05	1,18300E-05
13	391100	5129050	0,00050000	0,00005470	2,92700E-05	4,87900E-05
14	388000	5128630	0,00037833	0,00003104	1,49600E-05	2,23000E-06
15	388100	5128400	0,00031000	0,00020261	1,32680E-04	3,58600E-05
16	390850	5131200	0,00062833	0,00006875	3,82400E-05	5,24000E-06
17	380400	5123900	0,00065833	0,00006001	3,26300E-05	4,13000E-06
18	376800	5126200	0,00113667	0,00093169	7,36700E-04	1,99110E-04
19	390650	5135050	0,00062833	0,00012876	7,90300E-05	1,83800E-05
20	390700	5135200	0,00050000	0,00005128	2,71300E-05	7,98000E-06
21	394000	5110000	0,00062833	0,00011445	6,90200E-05	5,75100E-05
22	393950	5108550	0,00037833	0,00001035	4,04000E-06	1,09000E-06
23	397300	5108250	0,00025000	0,00002343	1,06700E-05	5,08000E-06
24	375600	5112550	0,00012167	0,00001330	5,50000E-06	2,04000E-06
25	375700	5112800	0,00062833	0,00001085	4,28000E-06	1,59000E-06
26	375400	5112400	0,00019000	0,00001247	5,08000E-06	7,00000E-07
27	375370	5112550	0,00012167	0,00013225	8,14900E-05	1,27300E-05
28	388300	5111100	0,00031000	0,00002905	1,38300E-05	2,82000E-06
29	397400	5108300	0,00037833	0,00004139	2,09700E-05	3,44000E-06
30	394800	5109000	0,00037833	0,00002758	1,29900E-05	3,51000E-06
31	395000	5108900	0,00037833	0,00003880	1,95200E-05	4,88000E-06
32	373700	5111100	0,00189333	0,00027009	1,83720E-04	6,12400E-05
33	376200	5113300	0,00037833	0,00001910	8,33000E-06	2,25000E-06
34	394600	5108800	0,00050000	0,00004686	2,44000E-05	4,98000E-06
35	394050	5110100	0,00025000	0,00001492	6,15000E-06	1,81000E-06
36	395150	5107550	0,00015167	0,00001421	5,97000E-06	4,97000E-06
37	396200	5107700	0,00044000	0,00020561	1,34920E-04	1,37700E-05
38	394700	5109400	0,00050000	0,00009124	5,31300E-05	1,77100E-05
39	394600	5109250	0,00037833	0,00007304	4,10400E-05	1,71000E-05
40	394700	5108800	0,00037833	0,00010337	6,13700E-05	1,33400E-05
41	397620	5124310	0,00047667	0,00004601	2,38800E-05	9,95000E-06
42	397490	5124210	0,00040833	0,00003941	1,98900E-05	2,52000E-06
43	379180	5125160	0,00174333	0,00010402	6,83700E-05	1,31500E-05

Moyenne	1,79197674E-05
Écart type	3,232645E-05

Tableau B.2 : Coefficient d'emmagasinement 0,005

Coefficient d'emmagasinement: 0,005

i	XNAD27	YNAD27	Q (m^3/hr)	Capspec (m^2/s)	T (m^2/s)	K (m/s)
1	398700	5128300	0,00019000	0,00003115	2,1610E-05	7,2000E-06
2	395700	5126400	0,00075833	0,00049890	4,6788E-04	4,3730E-05
3	382900	5111550	0,00037833	0,00004965	3,6510E-05	2,8500E-06
4	388250	5114870	0,00037833	0,00010337	8,2720E-05	3,0640E-05
5	382750	5121200	0,00037833	0,00024728	2,1682E-04	3,7380E-05
6	387250	5113950	0,00037833	0,00007290	5,6090E-05	9,1900E-06
7	382720	5121820	0,00072667	0,00002536	1,8700E-05	3,0700E-06
8	384250	5119600	0,00062833	0,00006444	4,8880E-05	3,2800E-06
9	385000	5121650	0,00037833	0,00013758	1,1356E-04	1,7740E-05
10	387760	5118250	0,00053000	0,00011597	9,3990E-05	6,2660E-05
11	384850	5121700	0,00050000	0,00020492	1,7631E-04	1,9380E-05
12	397100	5141220	0,00037833	0,00012404	1,0126E-04	1,5820E-05
13	391100	5129050	0,00050000	0,00005470	4,0700E-05	6,7830E-05
14	388000	5128630	0,00037833	0,00003104	2,1520E-05	3,2100E-06
15	388100	5128400	0,00031000	0,00020261	1,7413E-04	4,7060E-05
16	390850	5131200	0,00062833	0,00006875	5,2540E-05	7,2000E-06
17	380400	5123900	0,00065833	0,00006001	4,5140E-05	5,7100E-06
18	376800	5126200	0,00113667	0,00093169	9,2422E-04	2,4979E-04
19	390650	5135050	0,00062833	0,00012876	1,0553E-04	2,4540E-05
20	390700	5135200	0,00050000	0,00005128	3,7860E-05	1,1130E-05
21	394000	5110000	0,00062833	0,00011445	9,2620E-05	7,7180E-05
22	393950	5108550	0,00037833	0,00001035	6,2200E-06	1,6800E-06
23	397300	5108250	0,00025000	0,00002343	1,5650E-05	7,4500E-06
24	375600	5112550	0,00012167	0,00001330	8,2900E-06	3,0700E-06
25	375700	5112800	0,00062833	0,00001085	6,5700E-06	2,4300E-06
26	375400	5112400	0,00019000	0,00001247	7,7000E-06	1,0600E-06
27	375370	5112550	0,00012167	0,00013225	1,0870E-04	1,6980E-05
28	388300	5111100	0,00031000	0,00002905	1,9970E-05	4,0800E-06
29	397400	5108300	0,00037833	0,00004139	2,9670E-05	4,8600E-06
30	394800	5109000	0,00037833	0,00002758	1,8830E-05	5,0900E-06
31	395000	5108900	0,00037833	0,00003880	2,7680E-05	6,9200E-06
32	373700	5111100	0,00189333	0,00027009	2,3891E-04	7,9640E-05
33	376200	5113300	0,00037833	0,00001910	1,2520E-05	3,3800E-06
34	394600	5108800	0,00050000	0,00004686	3,4220E-05	6,9800E-06
35	394050	5110100	0,00025000	0,00001492	9,4600E-06	2,7800E-06
36	395150	5107550	0,00015167	0,00001421	8,9500E-06	7,4600E-06
37	396200	5107700	0,00044000	0,00020561	1,7697E-04	1,8060E-05
38	394700	5109400	0,00050000	0,00009124	7,2010E-05	2,4000E-05
39	394600	5109250	0,00037833	0,00007304	5,6210E-05	2,3420E-05
40	394700	5108800	0,00037833	0,00010337	8,2720E-05	1,7980E-05
41	397620	5124310	0,00047667	0,00004601	3,3520E-05	1,3970E-05
42	397490	5124210	0,00040833	0,00003941	2,8170E-05	3,5700E-06
43	379180	5125160	0,00174333	0,00010402	8,9640E-05	1,7240E-05

Moyenne	2,36904651E-05
Écart type	4,092882E-05

Tableau B.3 : Coefficient d'emmagasinement :0,0005

Coefficient d'emmagasinement: 0,0005

i	XNAD27	YNAD27	Q (m^3/hr)	Capspec (m^2/s)	T (m^2/s)	K (m/s)
1	398700	5128300	0,00019000	0,00003115	2,79400E-05	9,31000E-06
2	395700	5126400	0,00075833	0,00049890	5,66970E-04	5,29900E-05
3	382900	5111550	0,00037833	0,00004965	4,65500E-05	3,64000E-06
4	388250	5114870	0,00037833	0,00010337	1,03490E-04	3,83300E-05
5	382750	5121200	0,00037833	0,00024728	2,66140E-04	4,58900E-05
6	387250	5113950	0,00037833	0,00007290	7,07800E-05	1,16000E-05
7	382720	5121820	0,00072667	0,00002536	2,39100E-05	3,92000E-06
8	384250	5119600	0,00062833	0,00006444	6,18800E-05	4,15000E-06
9	385000	5121650	0,00037833	0,00013758	1,41130E-04	2,20500E-05
10	387760	5118250	0,00053000	0,00011597	1,17260E-04	7,81700E-05
11	384850	5121700	0,00050000	0,00020492	2,17240E-04	2,38700E-05
12	397100	5141220	0,00037833	0,00012404	1,26140E-04	1,97100E-05
13	391100	5129050	0,00050000	0,00005470	5,17500E-05	8,62600E-05
14	388000	5128630	0,00037833	0,00003104	2,78300E-05	4,15000E-06
15	388100	5128400	0,00031000	0,00020261	2,14600E-04	5,80000E-05
16	390850	5131200	0,00062833	0,00006875	6,64000E-05	9,10000E-06
17	380400	5123900	0,00065833	0,00006001	5,72600E-05	7,25000E-06
18	376800	5126200	0,00113667	0,00093169	1,10840E-03	2,99570E-04
19	390650	5135050	0,00062833	0,00012876	1,31350E-04	3,05500E-05
20	390700	5135200	0,00050000	0,00005128	4,82300E-05	1,41800E-05
21	394000	5110000	0,00062833	0,00011445	1,15590E-04	9,63200E-05
22	393950	5108550	0,00037833	0,00001035	8,33000E-06	2,25000E-06
23	397300	5108250	0,00025000	0,00002343	2,05200E-05	9,77000E-06
24	375600	5112550	0,00012167	0,00001330	1,09900E-05	4,07000E-06
25	375700	5112800	0,00062833	0,00001085	8,78000E-06	3,25000E-06
26	375400	5112400	0,00019000	0,00001247	1,02400E-05	1,40000E-06
27	375370	5112550	0,00012167	0,00013225	1,35210E-04	2,11300E-05
28	388300	5111100	0,00031000	0,00002905	2,58900E-05	5,28000E-06
29	397400	5108300	0,00037833	0,00004139	3,80600E-05	6,24000E-06
30	394800	5109000	0,00037833	0,00002758	2,44400E-05	6,61000E-06
31	395000	5108900	0,00037833	0,00003880	3,55500E-05	8,89000E-06
32	373700	5111100	0,00189333	0,00027009	2,92740E-04	9,75800E-05
33	376200	5113300	0,00037833	0,00001910	1,63900E-05	4,43000E-06
34	394600	5108800	0,00050000	0,00004686	4,37000E-05	8,92000E-06
35	394050	5110100	0,00025000	0,00001492	1,24800E-05	3,67000E-06
36	395150	5107550	0,00015167	0,00001421	1,18300E-05	9,86000E-06
37	396200	5107700	0,00044000	0,00020561	2,18030E-04	2,22500E-05
38	394700	5109400	0,00050000	0,00009124	9,03600E-05	3,01200E-05
39	394600	5109250	0,00037833	0,00007304	7,09300E-05	2,95500E-05
40	394700	5108800	0,00037833	0,00010337	1,03490E-04	2,25000E-05
41	397620	5124310	0,00047667	0,00004601	4,28400E-05	1,78500E-05
42	397490	5124210	0,00040833	0,00003941	3,61700E-05	4,58000E-06
43	379180	5125160	0,00174333	0,00010402	1,10410E-04	2,12300E-05

Moyenne	2,93125581E-05
Écart type	4,938654E-05

Tableau B.4 : Coefficient d'emmagasinement : 0,00005

Coefficient d'emmagasinement: 0,00005

i	XNAD27	YNAD27	Q (m^3/hr)	Capspec (m^2/s)	T (m^2/s)	K (m/s)
1	398700	5128300	0,00019000	0,00003115	3,41400E-05	1,13800E-05
2	395700	5126400	0,00075833	0,00049890	6,64670E-04	6,21200E-05
3	382900	5111550	0,00037833	0,00004965	5,64100E-05	4,41000E-06
4	388250	5114870	0,00037833	0,00010337	1,23900E-04	4,58900E-05
5	382750	5121200	0,00037833	0,00024728	3,14730E-04	5,42600E-05
6	387250	5113950	0,00037833	0,00007290	8,52100E-05	1,39700E-05
7	382720	5121820	0,00072667	0,00002536	2,89200E-05	4,74000E-06
8	384250	5119600	0,00062833	0,00006444	7,46500E-05	5,01000E-06
9	385000	5121650	0,00037833	0,00013758	1,68250E-04	2,62900E-05
10	387760	5118250	0,00053000	0,00011597	1,40150E-04	9,34300E-05
11	384850	5121700	0,00050000	0,00020492	2,57550E-04	2,83000E-05
12	397100	5141220	0,00037833	0,00012404	1,50610E-04	2,35300E-05
13	391100	5129050	0,00050000	0,00005470	6,26000E-05	1,04330E-04
14	388000	5128630	0,00037833	0,00003104	3,40100E-05	5,08000E-06
15	388100	5128400	0,00031000	0,00020261	2,54460E-04	6,87700E-05
16	390850	5131200	0,00062833	0,00006875	8,00100E-05	1,09600E-05
17	380400	5123900	0,00065833	0,00006001	6,91500E-05	8,75000E-06
18	376800	5126200	0,00113667	0,00093169	1,29044E-03	3,48770E-04
19	390650	5135050	0,00062833	0,00012876	1,56740E-04	3,64500E-05
20	390700	5135200	0,00050000	0,00005128	5,84000E-05	1,71800E-05
21	394000	5110000	0,00062833	0,00011445	1,38180E-04	1,15150E-04
22	393950	5108550	0,00037833	0,00001035	1,03900E-05	2,81000E-06
23	397300	5108250	0,00025000	0,00002343	2,51700E-05	1,19900E-05
24	375600	5112550	0,00012167	0,00001330	1,36400E-05	5,05000E-06
25	375700	5112800	0,00062833	0,00001085	1,09400E-05	4,05000E-06
26	375400	5112400	0,00019000	0,00001247	1,27200E-05	1,74000E-06
27	375370	5112550	0,00012167	0,00013225	1,61290E-04	2,52000E-05
28	388300	5111100	0,00031000	0,00002905	3,17400E-05	6,48000E-06
29	397400	5108300	0,00037833	0,00004139	4,62900E-05	7,59000E-06
30	394800	5109000	0,00037833	0,00002758	3,00100E-05	8,11000E-06
31	395000	5108900	0,00037833	0,00003880	4,32600E-05	1,08200E-05
32	373700	5111100	0,00189333	0,00027009	3,45790E-04	1,15260E-04
33	376200	5113300	0,00037833	0,00001910	2,01800E-05	5,45000E-06
34	394600	5108800	0,00050000	0,00004686	5,30000E-05	1,08200E-05
35	394050	5110100	0,00025000	0,00001492	1,54500E-05	4,54000E-06
36	395150	5107550	0,00015167	0,00001421	1,46600E-05	1,22200E-05
37	396200	5107700	0,00044000	0,00020561	2,58480E-04	2,63800E-05
38	394700	5109400	0,00050000	0,00009124	1,08390E-04	3,61300E-05
39	394600	5109250	0,00037833	0,00007304	8,53800E-05	3,55800E-05
40	394700	5108800	0,00037833	0,00010337	1,23900E-04	2,69400E-05
41	397620	5124310	0,00047667	0,00004601	5,19700E-05	2,16500E-05
42	397490	5124210	0,00040833	0,00003941	4,40000E-05	5,57000E-06
43	379180	5125160	0,00174333	0,00010402	1,30870E-04	2,51700E-05

Moyenne	3,48446512E-05
Écart type	5,774932E-05

Annexe C Guide d'utilisation du logiciel GMS 5.0

1.0 Conception de la base de données

Une des premières étapes consiste à mettre en forme une base de données contenant les données d'entrée allant servir à la construction du modèle. Nous avons choisi d'utiliser le logiciel *MICROSOFT ACCESS* pour nous aider à effectuer ce travail. Voici un aperçu des champs qui sont essentiels à prendre en considération dans la conceptualisation d'un modèle fait à partir de GMS :

	# Puits	Coordonnée X	Coordonnée Y	Indice Couche	Niveau de l'eau	Épaisseur des matériaux	Code Matière	Nom Matière
Nom	ID	XNAD27	YNAD27	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matiere	Nom_Matiere
Type	Numérique	Numérique	Numérique	Numérique	Numérique	Numérique	Numérique	Texte
Format	Entier Long	Réel Double	Réel Double	Entier Long	Réel Double	Réel Double	Réel Double	255

1.1 Notes explicatives des différents champs

- L'information des puits ou des forages sert à définir la stratigraphie, leur numéro doit être différent et défini au choix de l'utilisateur.

- Les coordonnées X et Y représentent les éléments servant à déterminer la position d'un point (puits ou forages) par rapport à un système de référence.

- Le ID couche (nom de la couche) permet de faire une représentation et une différenciation des couches sur l'ensemble du bassin. La meilleure façon de les identifier est de commencer par les données inférieures des puits de forages (c'est-à-dire les données les plus profondes). Les ID sont définis par ordre croissant (de 0 à 6 dans notre cas) et il suffit d'incrémenter le numéro de l'ID à chaque nouveau matériau ou nouvelle couche rencontrée. Toutefois, il faut tenir compte des différents matériaux

lors de leur définition car un matériau identique doit avoir le même ID partout.

- Si le niveau de l'eau est fourni, il peut être intéressant de le noter pour indiquer la hauteur manométrique en condition initiale.

- L'épaisseur des matériaux est reliée conjointement à leur ID couche. Il est conseillé d'identifier l'élévation du sol pour la couche supérieure par la valeur du MNA et par la suite soustraire l'épaisseur des couches successives négativement.

- Le nom et le code matière servent à différencier les unités géologiques.

1.1.2 Procédure de mise en forme des données provenant des puits et forages

Pour que les puits et forages soient convenablement importés dans GMS 4.0, il faut respecter une certaine structure :

1. Le dessus de la première couche représente l'altitude par rapport au niveau moyen des mers. Toutefois, GMS 4.0 n'est pas en mesure d'adapter lui-même les puits et forages en fonction du MNA.

2. GMS calcule la profondeur de chaque couche en effectuant la différence entre le haut de la première couche et de la deuxième couche. GMS obtient ainsi la profondeur de la première couche. Il faut donc définir la hauteur de chaque couche en fonction du MNA.

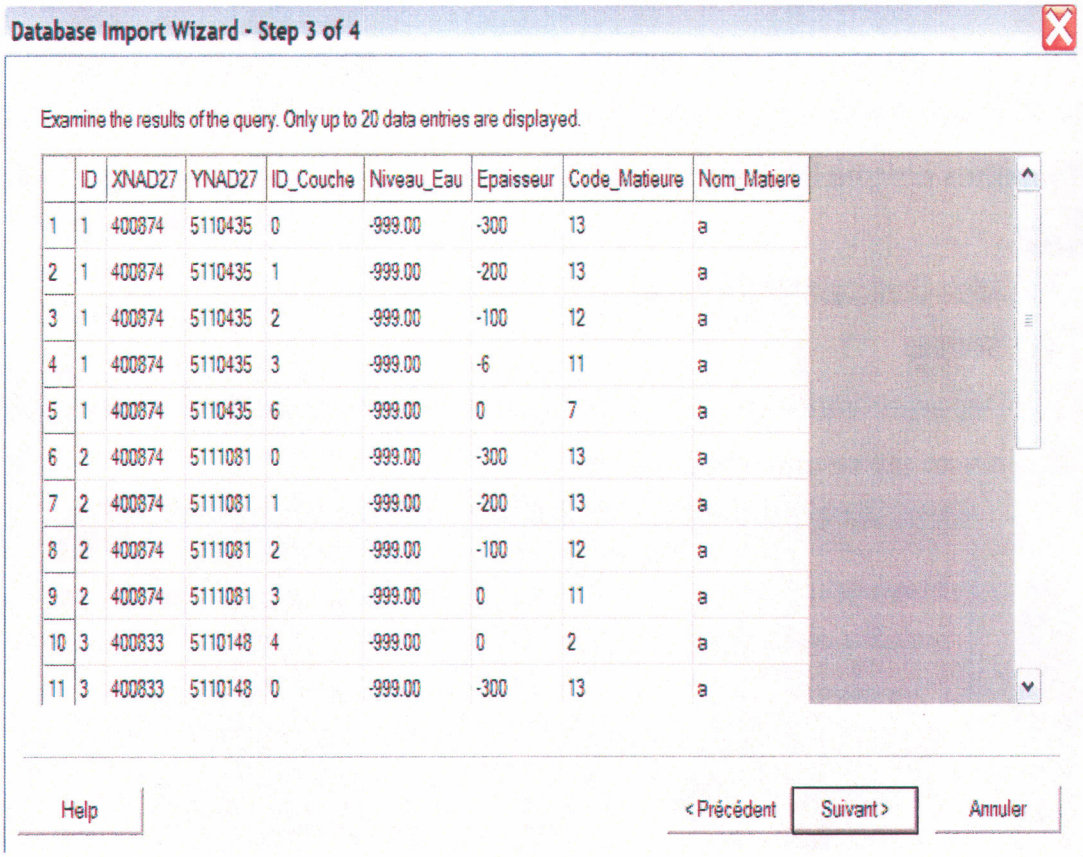
3. Une dernière couche est donc rajoutée pour finaliser le puits de forage

2.0 Procédure d'importation des données des puits et forages ainsi que leur représentation dans GMS[1].

2.1 Importation des données

La façon la plus simple d'importer des données dans GMS est d'utiliser une table à partir de requêtes construites préalablement en SQL et d'exploiter l'interface conviviale d'importation de données du logiciel.

1. Allez dans le menu *File*
2. *Import from Database*
3. On choisit le *DSN (Data Source Network)*



	ID	XNAD27	YNAD27	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure	Nom_Matiere
1	1	400874	5110435	0	-999.00	-300	13	a
2	1	400874	5110435	1	-999.00	-200	13	a
3	1	400874	5110435	2	-999.00	-100	12	a
4	1	400874	5110435	3	-999.00	-6	11	a
5	1	400874	5110435	6	-999.00	0	7	a
6	2	400874	5111081	0	-999.00	-300	13	a
7	2	400874	5111081	1	-999.00	-200	13	a
8	2	400874	5111081	2	-999.00	-100	12	a
9	2	400874	5111081	3	-999.00	0	11	a
10	3	400833	5110148	4	-999.00	0	2	a
11	3	400833	5110148	0	-999.00	-300	13	a

Figure C.1 : Exemple d'importation de la base de données à partir d'ACCESS.

[1] Méthode inspiré du tutoriel numéro 1 : Module 4 (*stratigraphy modeling – horizons and solids)*

Plusieurs choix sont offerts pour la distinction des types de données :

- Nuages de points 2D
- Nuages de points 3D
- Données d'observation / transitoire
- Données de puits
- Données de pompage
- Données de forage

Il faut choisir le mode *Boreholes data* (Données de forage) pour rentrer les informations et indiquer correctement les champs de la base de données.

Après cette étape, il se peut que les puits de forage ne soient pas visibles dû à une trop grande étendue du territoire. Il est donc possible de modifier certains paramètres comme l'indice *Z Magnification* pour les voir.

1. Allez dans le menu *Display*
2. *Setting*
3. Dépendamment de la surface, la valeur peut varier, dans notre cas, nous avons utilisé une valeur de 10

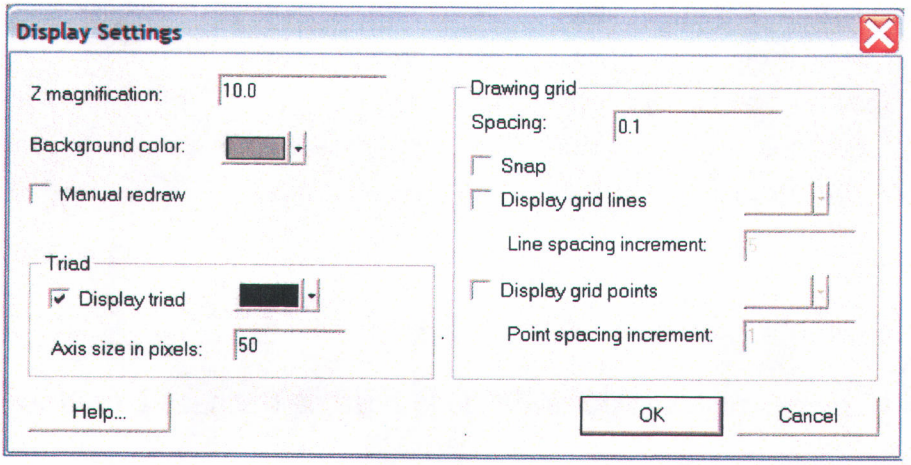


Figure C.2 : Exagération selon l'axe des Z

2.2 Méthode pour relier les puits de forage entre eux

Le processus pour relier les puits de forage se fait en deux étapes : relier les puits entre eux puis les couches entre elles.

2.2.1 Relation entre les puits

Les puits de forage doivent être reliés entre eux en respectant certaines règles pour que GMS puisse les exploiter de façon optimale.

1. Éviter d'entrecroiser les liens entre les puits.
2. Connecter un puits au plus grand nombre possible.

Procédure pour relier les puits entre eux :

1. Utiliser l'outil *Create Boreholes Cross Section* pour relier les puits de forages.
2. Un simple clic sur un puit pour commencer à les relier et un double clic pour arrêter.

2.2.2 Relation entre les couches

Comme nous avons défini des couches dans la base de données, il parait logique de s'assurer qu'elles sont bien reliées entre elles. Il faut le faire pour tous les puits de forage que l'on a reliés. En général, GMS va faire les liens entre les différentes couches de manière automatique mais il arrive que pour certains puits de forage, il en soit incapable. Ces couches doivent être reliées à la main.

Pour relier les couches :

1. Choisir l'outil *Select Boreholes Cross Section* que l'on retrouve dans les fonctions disponibles dans le menu de gauche.
2. Les liens entre les puits de forage vont ressortir.
3. Faire un double clic pour accéder au menu permettant de relier les couches.

Le menu nous offre différentes options :

- *Auto Match* : Fait le lien automatiquement entre les couches
- *Build* : Permet d'appliquer les couleurs aux couches (à utiliser après *Auto Match).*
- *Delete* : Permet de supprimer ce qui a été fait
- *Z Mag...* : Permet d'adapter le facteur de multiplication sur l'axe des Z. Il sert de zoom quand on veut travailler de manière très précise sur une petite zone.
- *Material...* : Permet d'éditer les informations des différents matériaux qui composent les couches.
- *Vert <--> Node* : Permet de passer d'un vertex à une *node* et vice versa. Ceci est utile quand on délimite les couches à la main.
- *TINs → Arcs* : Permet d'appliquer un *TIN* (*Triangulated Irregular Network*) aux couches entre deux puits.
- *Swap View* : Permet de voir les couches d'un autre angle.
- *Redistribute* : Comme pour les *TINs*, il permet de répartir correctement les points délimitant les couches quand on fait la délimitation à la main.

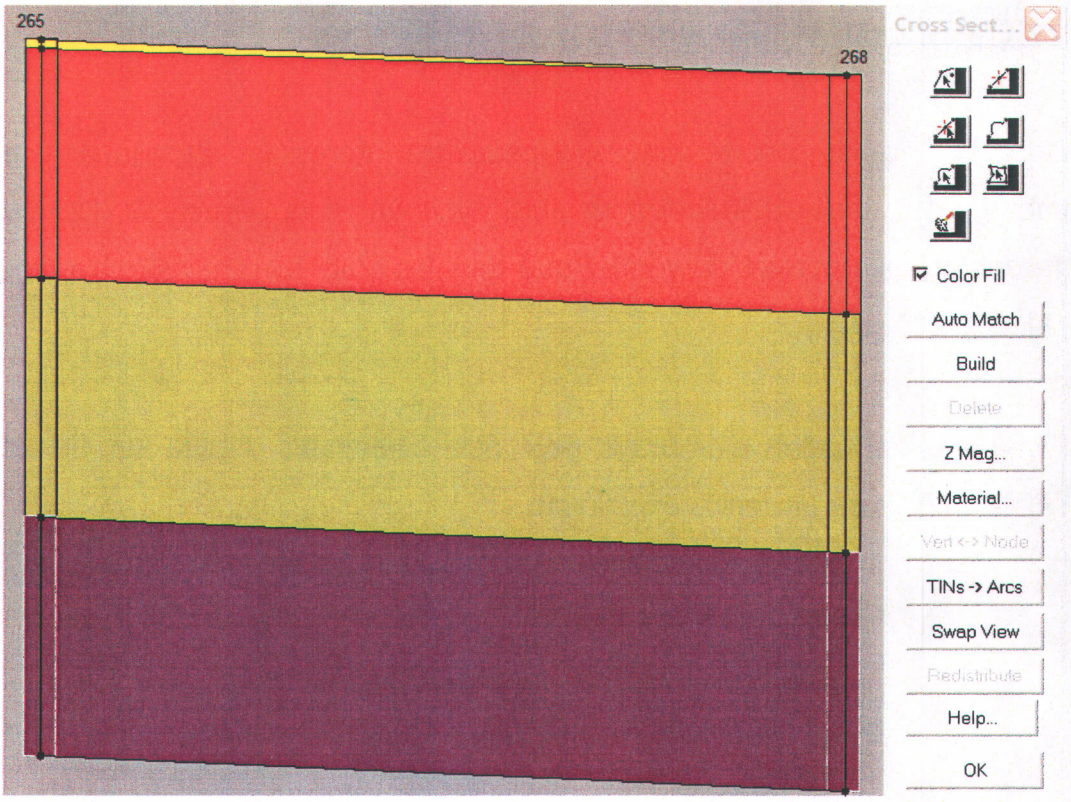


Figure C.3 : Relation entre les couches

La plupart du temps, l'option *Auto Match* peut être utilisée, raccourcissant considérablement le temps d'exécution. Toutefois, si entre deux puits, le nombre de couches diffère, l'option *Auto Match* n'est pas disponible. Lorsque toutes les couches seront reliées entre elles, il ne reste qu'à construire celle-ci avec l'option *Build*.

GMS offre la possibilité de reproduire les liens stratigraphiques à morphologie précise en utilisant la fonction *TIN's –> Arcs* au lieu d'utiliser l'interpolation et ainsi créer des couches limites horizontales.

2.3 Représentation visuelle des puits de forages

Lorsque ces étapes sont terminées, il peut être intéressant d'appliquer l'option d'ombrage au modèle (*Shade*) pour ainsi avoir un rendu visuel 3D. De même, cette option nous permet de vérifier que tous les puits sont reliés entre eux par cet ajout de couleur.

Toutefois, cette option d'ombrage peut être seulement utilisée sur de petites surfaces pour avoir un rendu exploitable.

3.0 Passage des puits de forages en solide

Une fois le travail sur les puits de forages terminé, une option transformant les horizons en *solides* permet d'importer les informations dans MODFLOW. Il n'y a malheureusement pas de contrôle sur la manière dont GMS fait son interpolation, laissant peu de manœuvre à l'utilisateur.

3.1 Délimitation du terrain

La délimitation du terrain se fait en mode carte (*Map*). Une première délimitation consiste à dessiner le contour du terrain avec l'outil *Create Arcs*. Cet outil est accessible sur le panneau de gauche. Pour débuter, un clic gauche permet d'engendrer la délimitation, ainsi chaque clic suivant marquera un point d'encrage et pour la finaliser, il suffira d'un double clic.

3.2 Création du TIN (*Triangulated Irregular Network*)

Il est important de créer des points d'encrage à des distances constantes car ils permettront une délimitation des *TINs* équilibrée. Une distribution automatique peut être activée en suivant cette procédure :

1. *Feature Object*
2. *Redistribute Vertices*

Par défaut, GMS propose une valeur d'espacement entre les points en fonction du nombre de points qu'il y a sur l'arc. Toutefois, si il y a très peu de points, il est possible de mettre une valeur plus petite pour qu'il en rajoute. Plus le nombre de points sera grand, plus la précision sera conséquente.

L'arc doit être transformé en polygone pour ainsi en faire la transformation en *TIN*. Voici la procédure à suivre :

1. Sélectionner l'arc avec l'outil *Select arc*
2. *Feature Object*
3. *Build Polygon*

IL ne reste plus qu'à créer le *TIN*. Il suffit de suivre la procédure :

1. Allez dans le menu *Feature Object*
2. *Map->TIN*

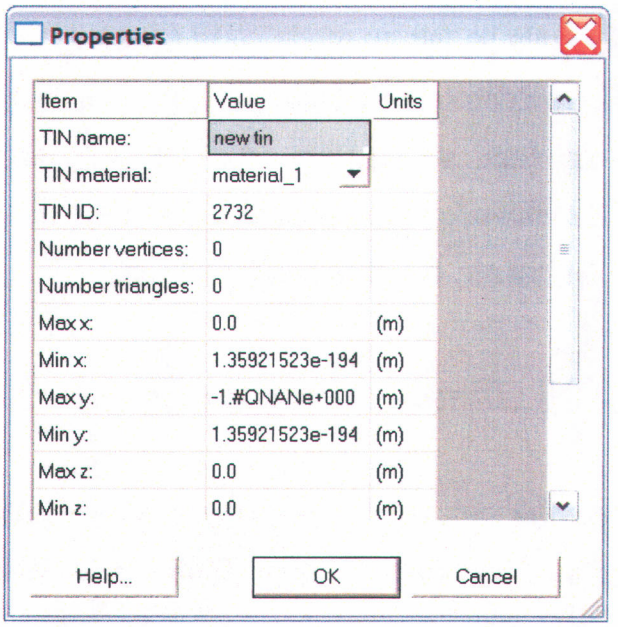


Figure C.4 : Enregistrement du *TIN*

Lorsque la fenêtre ci-dessus apparaît, vous n'avez qu'à changer le nom pour caractériser le nouveau projet de *TIN*.

3.3 Utilisation du *TIN* pour obtenir une stratigraphie complexe (*Solid*)

GMS utilise le *TIN* créé pour faire la répartition des différents matériaux en fonction des données disponibles. Il est important de s'assurer que le *TIN* soit homogène et assez précis pour s'assurer un travail de qualité.

Il faut être en mode puits de forage (*boreholes*) pour effectuer la transformation et suivre la procédure :

1. Allez dans le menu *Boreholes*
2. *Horizons → Solids*

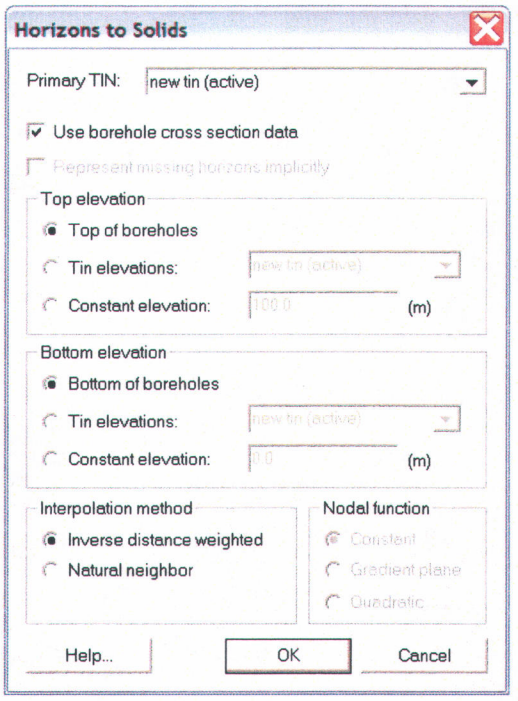


Figure C.5 : *Horizons to Solids*

Dans cette fenêtre, il est possible d'utiliser plusieurs options au choix de l'utilisateur et qui sont représentées ci-dessus. Pour pouvoir visualiser le travail effectué par GMS, il faut tout d'abord désactiver l'affichage du *TIN* dans l'onglet de droite. Tout comme pour les puits de forages, il suffit d'aller dans le mode

solide et de cliquer sur le bouton ombre pour avoir un rendu visuel qui nous permet de différencier les zones. En plus d'avoir une meilleure vue d'ensemble, ceci permet de comparer la représentation faite par GMS avec celle que l'on trouve sur le terrain.

4.0 Préparation de la grille 3D

La prochaine étape est la construction de la grille 3D sur laquelle MODFLOW va venir s'appuyer dans ses représentations et pour stocker les différentes valeurs dont il a besoin. Il est donc très important de la faire correctement et d'investir le temps nécessaire à sa bonne conception, sinon c'est l'ensemble du modèle qui risque d'en souffrir.

4.1 Création de la grille

Les informations suivantes sont demandées :

- Les coordonnées X et Y du coin inférieur gauche
- La grandeur du terrain (sous la forme d'un cube)
- Leur nombre de cellules

Il faut suivre la procédure suivante en étant dans le mode Grille 3D :

1. Allez dans le menu *Grid*
2. *Create Grid*

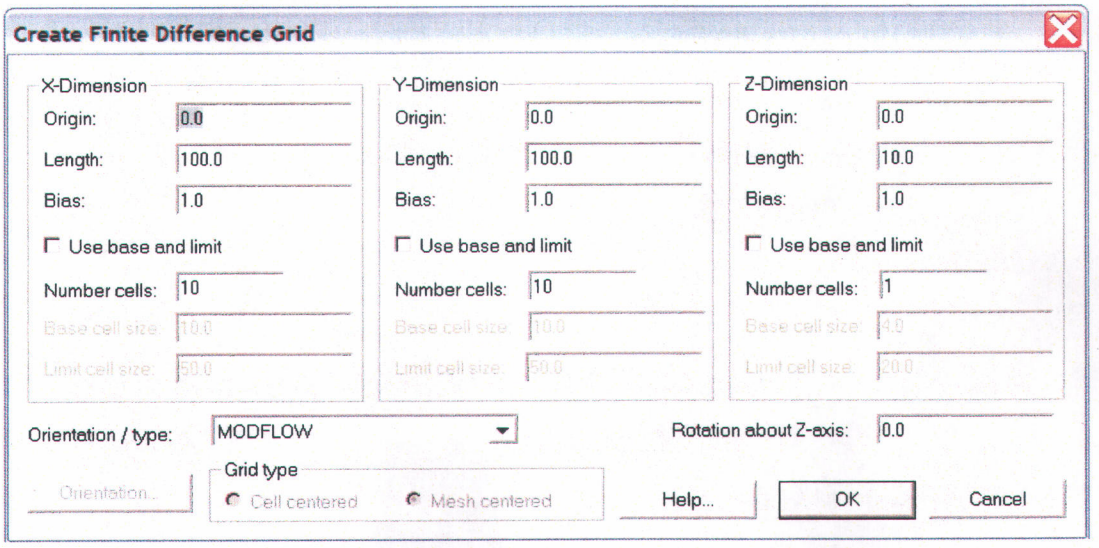


Figure C.6 : Création d'une grille

Il est conseillé de ne faire qu'une couche selon l'axe des Z pour optimiser le temps de création de la grille. Il est possible de donner un angle de rotation à la grille pour, par exemple, simuler le plus précisément l'écoulement le long d'une faille ou de fissure.

4.2 Délimitation de la grille

À prime abord, il est conseillé d'utiliser un DXF ou une image comme planche de fond pour voir la limite du bassin pour ainsi se fixer des bornes de délimitation. Par la suite, un travail à la main est demandé pour délimiter précisément le bassin versant.

4.2.1 Frontière de la grille

Pour mieux voir la limite du bassin, il suffit de zoomer pour faire ressortir la limite sous la grille. Pour faire la délimitation, il faut sélectionner les cellules en dehors du territoire. On peut en sélectionner plus d'une à la fois en tenant enfoncée la touche majuscule du clavier. Il est conseillé d'y aller par petit groupes de cellules car si on a le malheur de relâcher la touche majuscule et cliquer ailleurs sur la grille, on vient de perdre toutes les cellules que l'on a sélectionnées.

Une fois nos cellules sélectionnées, il suffit de suivre la procédure :

1. Allez dans le menu *Grid*
2. *Inactive Cells*

Les cellules vont disparaître de l'écran et MODFLOW n'en tiendra pas compte durant la simulation. Il faut répéter l'opération jusqu'au moment où le bassin sera correctement découpé.

4.2.2 Couches de la grille

Une fois la délimitation du terrain faite, on se retrouve avec une seule couche pour tout l'axe des Z. Si on ne les a pas définies lors de la création de la grille, c'est parce que GMS oblige alors de faire la délimitation de la frontière pour chacune des couches. Avec cette méthode, il n'y a pas besoin de le faire.

Il suffit seulement de changer de point de vue par rapport aux axes et aller en vue par rapport au J. L'icône pour ajouter une couche selon l'axe des Z devient donc disponible d'utilisation.

5.0 Création du modèle avec MODFLOW

Une fois le terrain défini, nous pouvons passer à l'étape de la création du modèle avec MODFLOW. Un choix judicieux des ensembles d'outils permet de représenter le plus fidèlement possible la réalité. Il nous faut donc choisir :

- la méthode de simulation
- les modules que l'on veut activer
- définir une période de temps

Pour créer le modèle, il faut suivre la procédure suivante :

1. Allez dans le menu *MODFLOW*
2. *New Simulation...*

5.1 Choix des options à utiliser

À partir de cette étape, il faut choisir entre les options d'exécution du modèle décrites ci-dessous :

- Exécution du modèle
- Analyse de sensibilité
- Estimation des paramètres
- Simulation stochastique

Et le type de modèle :

- Régime permanent
- Régime transitoire

Dans le cadre de notre projet, nous avons utilisé comme méthode d'exécution du modèle le choix exécution du modèle (*Forward Run*) avec le modèle régime transitoire (*Transcient*) qui permet de définir une période de temps.

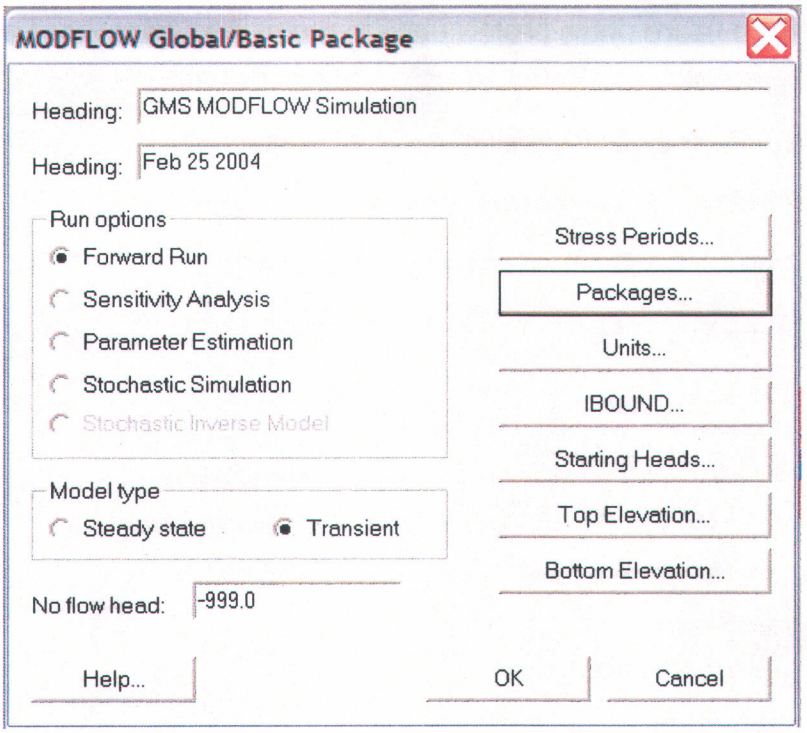


Figure C.7 : Options de MODFLOW

5.1.1 Choix des modules à utiliser

Il faut aussi faire le choix des modules de points de sources et de puits que l'on veut exploiter :

- Rivières
- L'Écoulement
- Lacs
- Puits
- Barrière horizontale du flux
- Cours d'eau
- Hauteur d'eau spécifique variant dans le temps

Enfin, il faut choisir les modules pour les zones de sources et de puits :

- Recharge
- Evapotranspiration

Toujours dans le cadre notre projet, dans le menu *Packages*, nous avons choisi les modules suivants :

- Rivière : Permet la représentation des rivières.
- Lac : Permet de représenter les lacs.
- Recharge : Permet de représenter la recharge.

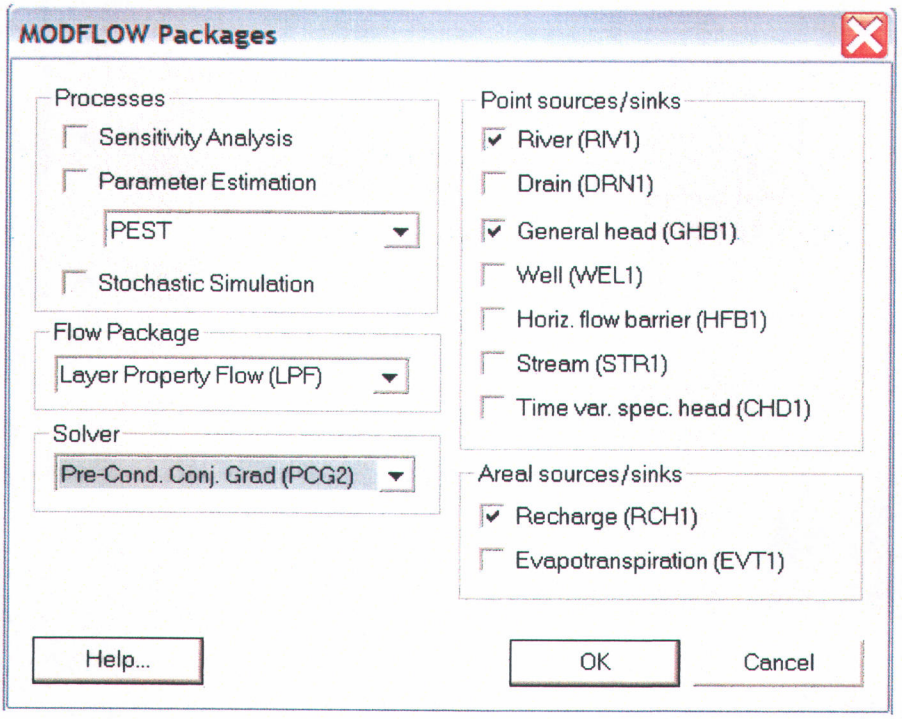


Figure C.8 : Choix des modules pour MODFLOW

5.1.2 Définition des unités

Dans le menu *Units*, il faut s'assurer que les unités correspondent aux données disponibles.

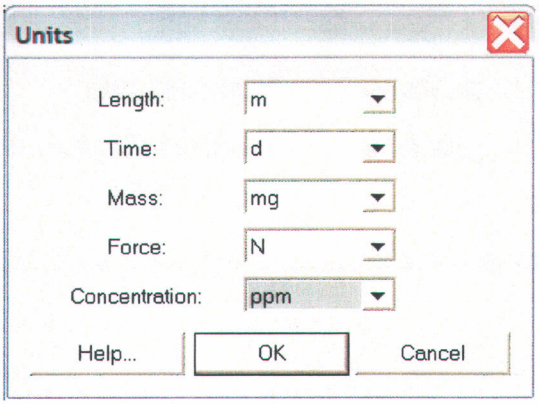


Figure C.9 : Choix des unités

5.1.3 Définition de la période de temps

Dans le cadre de notre projet, nous avons décidé de définir une période de temps pour voir l'évolution du modèle au fil des mois et ainsi pouvoir comparer les valeurs simulées avec celles que nous avons prises sur le terrain ou obtenues pour les différents mois.

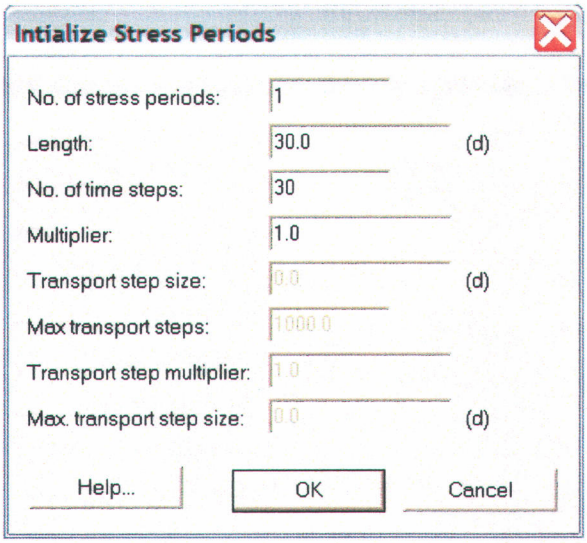


Figure C.10 : Choix pour initialiser une période de temps

Dans la fenêtre qui est apparue lorsqu'on créait un nouveau modèle, il suffit de cliquer sur *Stress Period* pour arriver à la fenêtre ou l'on peut la définir. Il y a deux choses à faire :

- Définir le nombre de périodes
- Définir le nombre de jours durant une période.

Pour ce faire, il suffit de cliquer sur le bouton *Initialize...* et de rentrer les valeurs que l'on veut utiliser :

- Période de stress : nombre de fois que vous allez avoir une période de temps
- Longueur des périodes
- Période de temps : nombre de sous-divisions que la période de stress va avoir.

Une fois ceci fait, il reste un choix à effectuer pour représenter les périodes de temps :

- utiliser des dates
- ou bien des chiffres

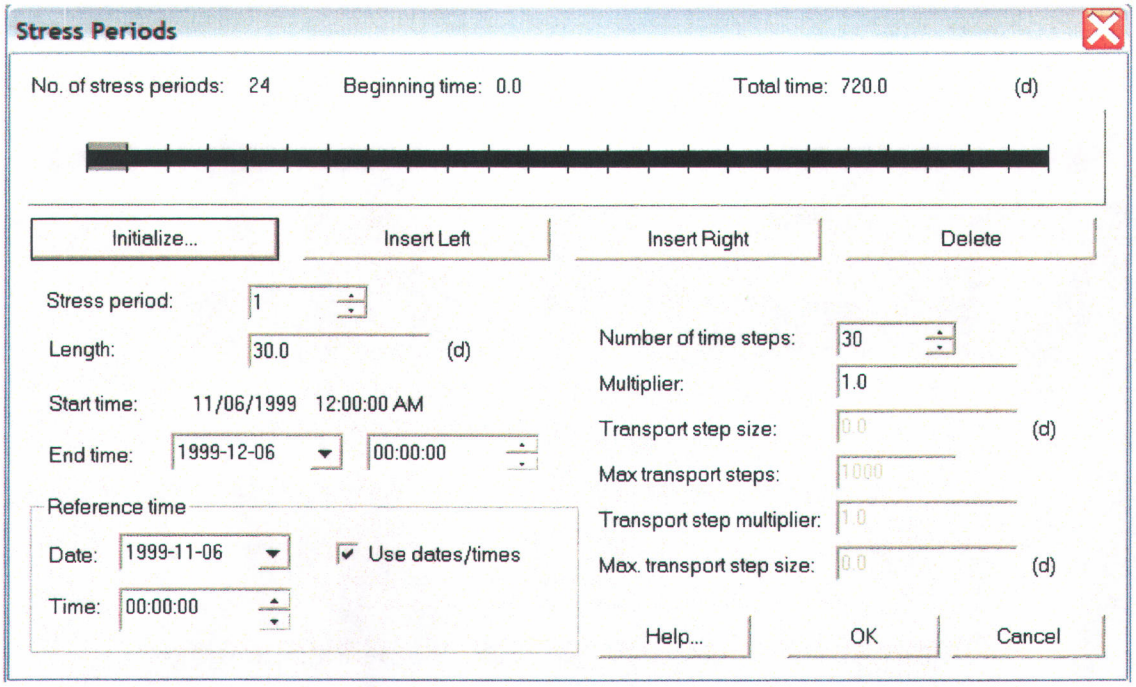


Figure C.11 : Définition de la période de stress

6.0 Saisie des données dans le modèle de MODFLOW

Cette étape est complexe car tous les modules fonctionnent différemment. En effet, selon certains modules, la saisie des données peut se faire de façon matricielle ou bien à partir des fichiers textes ou même à la main. Ces étapes rallongent considérablement le temps de travail et d'exécution.

6.1 Modulation stratigraphique complexe

Les *solids* peuvent représenter une grande variété de relations stratigraphiques complexes. La commande *Solids → MODFLOW* permet d'appliquer automatiquement :

- La conductivité hydraulique horizontale
- La conductivité hydraulique verticale
- L'élévation maximale des couches
- L'élévation minimale des couches
- Le coefficient d'emmagasinement

Pour ce faire, il faut se mettre en mode *Solids* :

1. Allez dans le menu *Solids*
2. *Solids → MODFLOW...*

6.1.1 Technique d'interpolation

Plusieurs choix vous sont offerts en ce qui a trait à la méthode d'interpolation, les voici :

- *Boundary Matching* modifie les cellules de la grille pour épouser le contour exact de la stratigraphie
- *Grid Overlay* la stratigraphie est découpée en fonction de la grille

- *Grid Overlay with K Equivalent* qui est l'équivalent du *Grid Overlay,* toutefois, en incorporant une ligne de transition au pourtour des limites entre les différents matériaux.

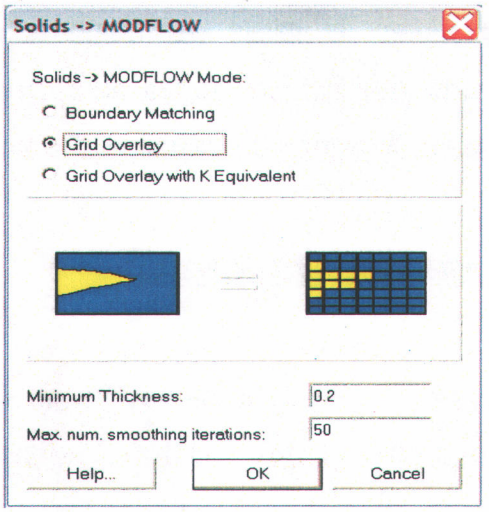


Figure C.12 : Passage des *solids à MODFLOW*

6.2 Propriétés des matériaux

La prochaine étape consiste à caractériser les matériaux en suivant la procédure suivante :

1. Allez dans le menu *MODFLOW*
2. *Material Properties...*

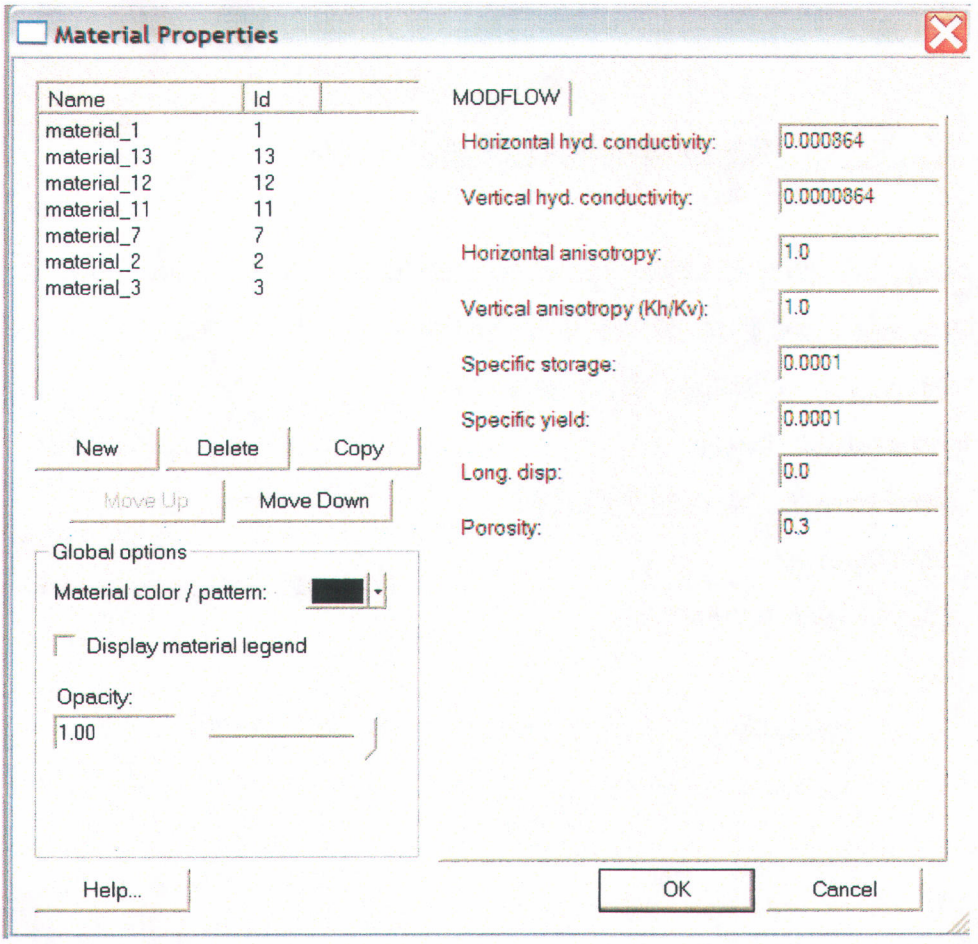


Figure C.13 : Propriétés spécifiques des matériaux

Comme on le constate sur la figure ci-dessus, MODFLOW demande les informations suivantes :

- Conductivité hydraulique horizontale [2]
- Conductivité hydraulique verticale
- Anisotropie horizontale
- Anisotropie verticale
- Emmagasinement spécifique
- Rendement spécifique

[2] Il est important de s'assurer de la cohérence des valeurs de conductivité hydraulique horizontale et verticale car, dans l'éventualité de valeurs trop faibles, certaines zones pourraient être complètement asséchées et entraîner une défaillance à la modélisation.

- Porosité

6.2.1 Utilisation des propriétés des matériaux

Par défaut, MODFLOW utilise les valeurs de conductivité hydraulique contenues dans la grille. Il est plus avantageux d'utiliser les valeurs des matériaux car il se sera plus rapide et simple de changer une valeur qu'une partie d'une matrice. Voici la méthode à suivre :

1. Allez dans le menu MODFLOW
2. *LPF Package*
3. Cocher *Use material IDs*

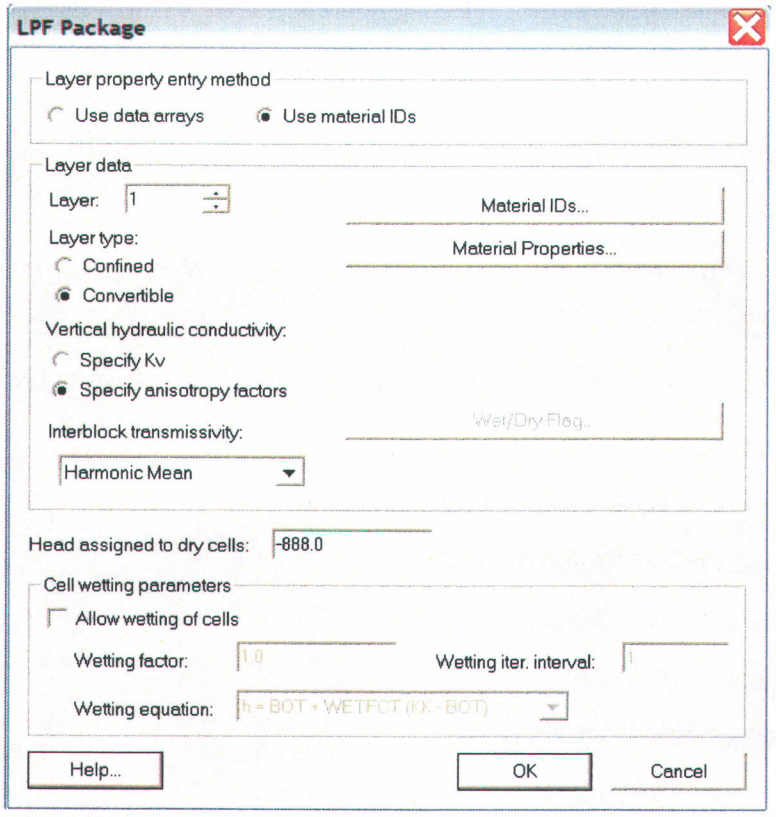


Figure C.14 : Paramètres pour utiliser les valeurs des matériaux dans MODFLOW

6.3 L'élévations des couches

Il reste une dernière étape à effectuer avant de rajouter les différentes composantes naturelles au modèle (recharge, lacs, rivières etc.). Il faut délimiter la hauteur des couches pour pouvoir positionner spatialement les composantes.

La manière la plus efficace de saisir les valeurs est d'utiliser une matrice au format de la grille 3D[3]. Pour que GMS accepte la matrice, il faut que l'entête contienne ces informations :

- Même coordonnées X et Y du coin inférieur gauche
- Même grandeur du terrain
- Même nombre de cellules

Une fois le format de la matrice finalisé, il faut l'importer dans GMS :

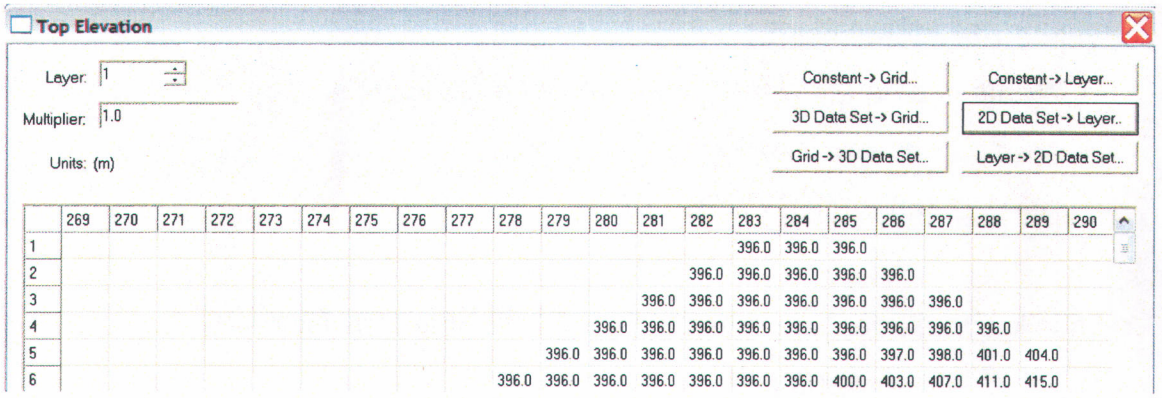
1. Allez dans le menu File
2. *Open...*
3. Sélectionner votre matrice
4. Choisissez *Import as a grid*

Lorsque celle-ci est correctement importée, une grille 2D se rajoute instantanément au projet. Il faut savoir que GMS accomplit une semi-automatisation lors de l'implémentation en ce qui a trait aux caractéristiques des couches. Effectivement, il suffit d'entrer la valeur inférieure d'élévation d'une couche pour que celui-ci applique cette même valeur au haut de la couche inférieure. Nous avons donc seulement à spécifier la valeur supérieure de la première couche et la valeur inférieure de toutes les couches.

[3] Pour plus d'information concernant le format des fichiers, veuillez vous référer à la documentation : *Files Formats*, pages 20

À présent, il reste à implémenter les valeurs :

1. Allez dans le menu *MODFLOW*
2. *Global Option…*
3. *Top Elevation* ou *Bottom Elevation* selon la situation
4. *2D Data Set → Layer…*
5. Choisir la grille en 2D



	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290
1															396.0	396.0	396.0					
2														396.0	396.0	396.0	396.0	396.0				
3													396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	396.0			
4												396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	396.0		
5											396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	397.0	398.0	401.0	404.0	
6										396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	396.0	400.0	403.0	407.0	411.0	415.0	

Figure C.15 : Délimitation des couches pour l'élévation

6.4 Définition des niveaux piézométriques de départ

Les niveaux piézométriques de départ servent à établir des valeurs initiales pour les niveaux piézométriques lorsqu'on effectue un régime transitoire. Si, par contre, vous effectuez un régime permanent, il n'est pas nécessaire de les spécifier car ceci n'apportera pas de changement au résultat de la simulation. Il est conseillé de mettre des valeurs très proches du niveau piézométrique final car ceci permet à MODFLOW de converger plus rapidement vers la solution. Si les valeurs sont trop basses, MODFLOW va considérer les cellules comme desséchées.

Nous avons utilisé des matrices pour implanter plus facilement les valeurs. Une fois les matrices correctement importées :

1. Allez dans le menu *MODFLOW*
2. *Global Option...*
3. *StarTINg Heads*
4. *2D Data Set → Array*
5. Sélectionner la grille 2D importée précédemment

6.5 Recharge

La procédure pour saisir les valeurs de recharge est très semblable à la procédure pour l'élévation des couches. La façon la plus simple et précise d'implémenter les valeurs de recharge est de travailler avec l'aide d'une matrice. Toutefois, il est conseillé de respecter les mêmes règles pour la conception et l'importation de matrices de recharge que celles décrites pour les matrices d'élévation des couches. Une fois que la matrice est correctement importée, il suffit de suivre la procédure suivante :

1. Allez dans le menu *MODFLOW*
2. Allez dans le sous menu *Source/Skin Package*
3. *Recharge Package...*
4. *2D Data Set → Array*
5. Sélectionner la grille 2D importé précédemment

Il faut être conscient que si les données varient avec le temps, la procédure doit être répétée pour chaque période de stress. Sinon, il suffit de cocher la case *Use previous* pour que les informations se dupliquent pour chaque période de stress.

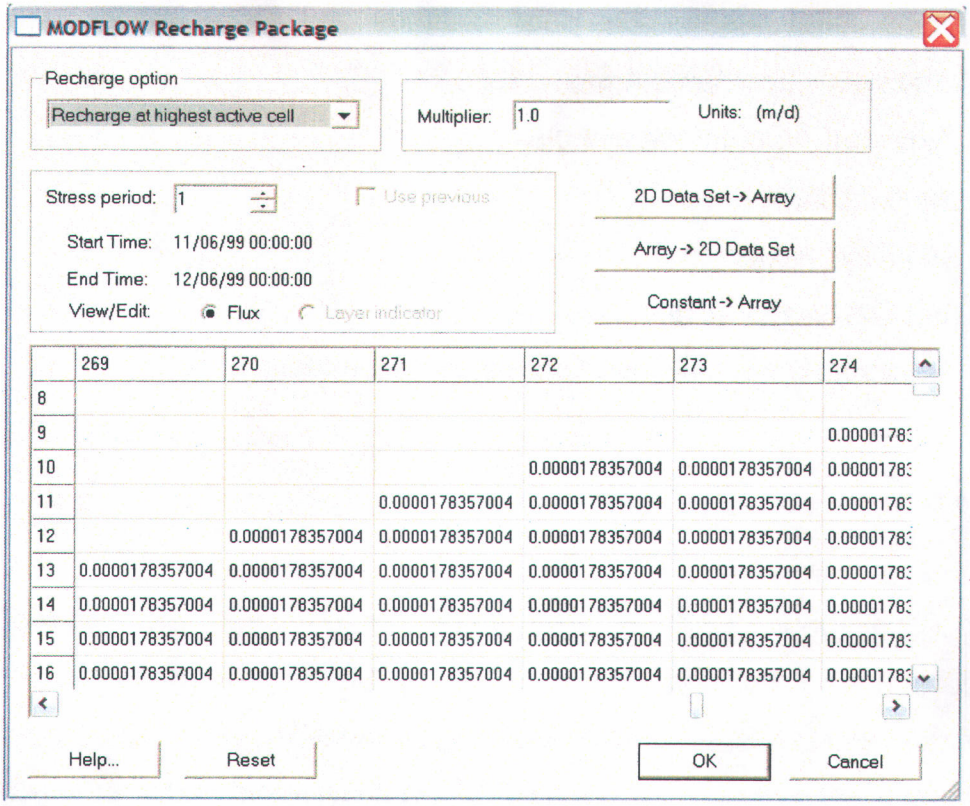


Figure C.16 : Options de recharge

6.6 Les lacs

La manière de saisir les lacs ressemble à celle utilisée pour la délimitation de la grille. En fait, avec l'outil de sélection, il faut distinguer les cellules qui composent le lac et ensuite lui fournir les caractéristiques demandées. Voici la procédure une fois les cellules sélectionnées :

1. Allez dans le menu MODFLOW
2. Point Sources/Sinks
3. Cliquez sur *News* pour *General Head*

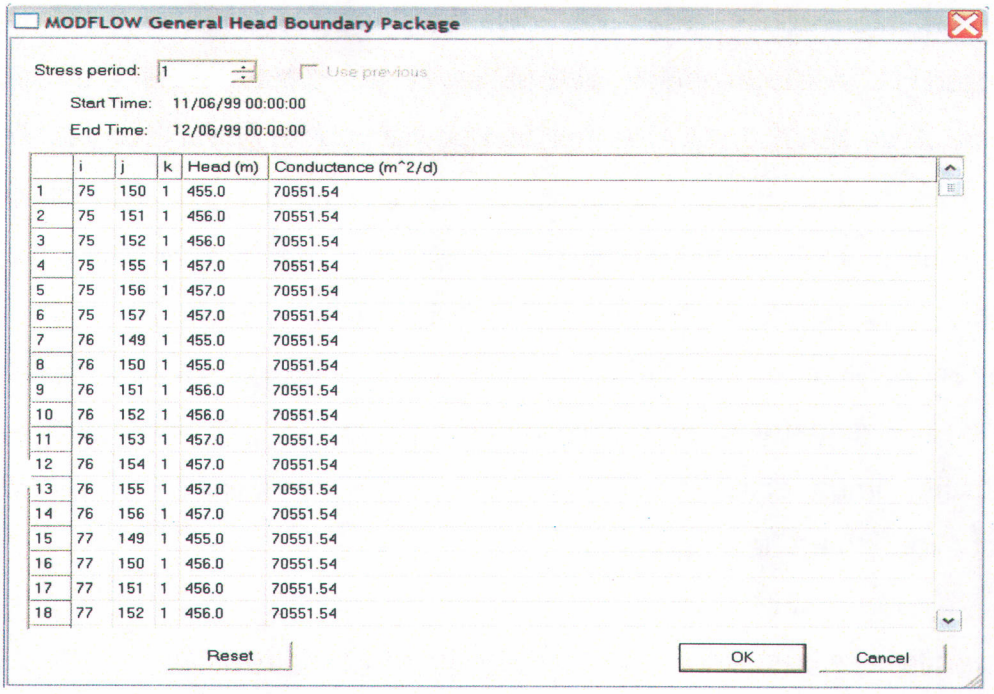
Une fois les lacs identifiés, voici les informations demandées par GMS :

- Hauteur d'eau
- Conductance

Toutes les informations saisies sont identifiées non pas selon les coordonnées de la projection stéréographique utilisée selon les projets mais bien selon un système d'axe 3D (I, J, K). Une délimitation par couche (*layer*) identifie l'axe des K et, dépendamment de la grandeur de la matrice, les cellules ont une coordonnée I, J. Il est primordial de conserver la même structure et la même grandeur des matrices que la grille initiale pour éviter un rejet lors de l'importation. Nous avons conçu un programme pouvant, d'une certaine façon, « dérouler » les matrices en trois colonnes (I, J, valeurs). En effet, avec cet outil, il est facile d'importer les coordonnées des cellules et les valeurs dans un tableur pour pouvoir y faire des requêtes.

Pour spécifier les lacs, il suffit de suivre la procédure suivante :

1. Allez dans le menu *MODFLOW*
2. *Source/Skin Packages*
3. *General Head Package* (il n'y pas de module spécifique pour les lacs)
4. Il ne reste plus qu'à transposer les valeurs recherchées grâce aux requêtes.



	i	j	k	Head (m)	Conductance (m^2/d)
1	75	150	1	455.0	70551.54
2	75	151	1	456.0	70551.54
3	75	152	1	456.0	70551.54
4	75	155	1	457.0	70551.54
5	75	156	1	457.0	70551.54
6	75	157	1	457.0	70551.54
7	76	149	1	455.0	70551.54
8	76	150	1	455.0	70551.54
9	76	151	1	456.0	70551.54
10	76	152	1	456.0	70551.54
11	76	153	1	457.0	70551.54
12	76	154	1	457.0	70551.54
13	76	155	1	457.0	70551.54
14	76	156	1	457.0	70551.54
15	77	149	1	455.0	70551.54
16	77	150	1	456.0	70551.54
17	77	151	1	456.0	70551.54
18	77	152	1	456.0	70551.54

Figure C.17 : Propriétés des lacs

6.7 Les rivières

6.7.1 Délimitation des rivières

La délimitation des rivières est plus complexe car il faut construire une carte qui symbolise celles-ci pour ensuite l'intégrer dans MODFLOW.

1. Passer en mode Carte
2. Clic droit dans la colonne de droite
3. *New Coverage*
4. Clic droit sur le nouveau Coverage
5. Propriété
6. Choisir le type MODFLOW /MT3D /MODPATH

C'est en utilisant l'outil *arc* qu'il est convenable de créer la délimitation physique des rivières. La seule chose importante à garder en tête, c'est que la direction des arcs dot suivre le sens de l'écoulement de la rivière[4].

Lorsque les arcs sont créés, il faut déterminer que ceux-ci sont des rivières :

1. Sélectionner les arcs
2. Allez dans le menu *Feature Objects*
3. *Properties...*
4. Sélectionner *River*

Il faut à présent convertir l'information concernant les lacs du mode *MAP* à *MODFLOW*:

1. Allez dans le menu *Feature Objects*
2. *Map → MODFLOW*
3. Choisir *Active coverage only*

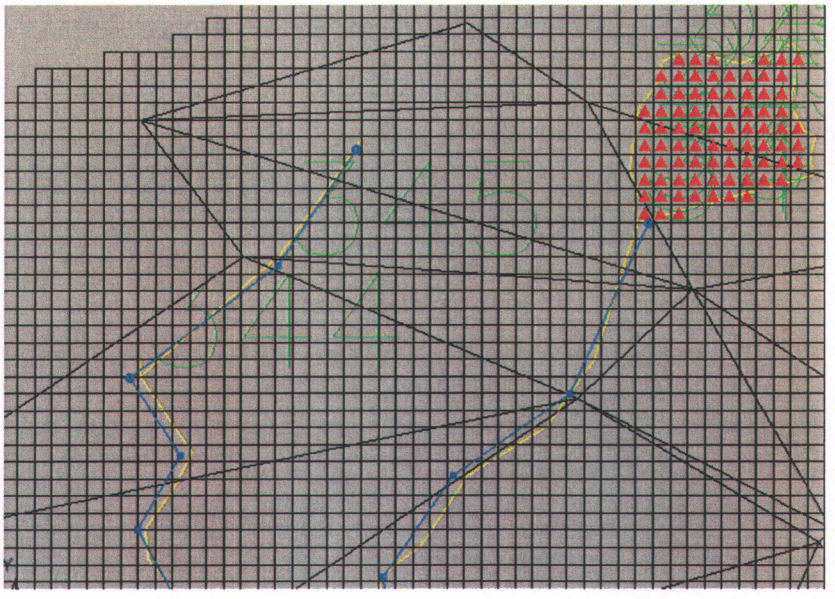


Figure C.18 : Délimitation des rivières en suivant un DXF

[4] GMS prend en considération le sens de la création de l'arc pour spécifier l'écoulement.

6.7.2 Saisie des valeurs reliées aux rivières

Les valeurs demandées sont :

- Le niveau de l'eau
- La conductance
- La profondeur de la rivière

Il faut dérouler les matrices contenant les informations de la même façon que nous l'avons fait pour obtenir l'information des lacs. Une fois le même raisonnement appliqué, il suffit de rentrer les valeurs de cette façon :

1. Allez en mode *3D Grid*
2. Allez dans le menu *MODFLOW*
3. *Source/Skin Package*
4. *River Package*

MODFLOW River Package

Stress period: 1 Use previous

Start Time: 11/06/99 00:00:00

End Time: 12/06/99 00:00:00

	i	j	k	Stage (m)	conductance (m^2/d)	elevation (m)
1	19	273	1	412.0	34213.0	411.4
2	20	272	1	413.0	34213.0	412.4
3	20	273	1	415.0	34213.0	414.4
4	21	272	1	416.0	34213.0	415.4
5	22	271	1	416.0	34213.0	415.4
6	22	272	1	417.0	34213.0	416.4
7	23	270	1	416.0	34213.0	415.4
8	23	271	1	418.0	34213.0	417.4
9	24	269	1	417.0	34213.0	416.4
10	24	270	1	420.0	34213.0	419.4
11	25	268	1	422.0	34213.0	421.4
12	25	269	1	425.0	34213.0	424.4
13	26	267	1	427.0	55296.0	426.4
14	26	268	1	435.0	55296.0	434.4
15	26	268	1	435.0	55296.0	434.4
16	27	266	1	430.0	55296.0	429.4
17	27	267	1	439.0	55296.0	438.4

Figure C.19 : Valeurs des rivières

6.8 Hauteur d'eau piézométrique spécifique

Les hauteurs d'eau piézométriques spécifiques permettent d'indiquer à MODFLOW par où l'eau doit s'évacuer. Ceci est très important de les placer dans le modèle sinon l'eau restera prise et il formera des piscines.

Les hauteurs d'eau piézométriques spécifiques ne doivent être placées que sur une courte section de notre terrain, sur la bordure de ce dernier et très proche de la principale sortie d'eau du terrain. Ceci force MODFLOW à faire sortir l'eau par cet endroit et par le fait même à utiliser correctement les rivières.

Pour ajouter les hauteurs d'eau piézométriques spécifiques :

1. Sélectionner les cellules qui vont servir de hauteurs d'eau piézométriques spécifiques
2. Allez dans le menu MODFLOW
3. *Cell Properties...*
4. Changer le IBOUND pour *Spec. Head*

6.9 Les points d'observation

Il reste uniquement les points d'observation recueillis sur le terrain à rajouter au modèle. Les points d'observation permettent de comparer les valeurs calculées par GMS avec celle observées. Grâce à cette comparaison, une certaine calibration peu être envisageable.

Voici les informations nécessaires :

- Coordonnées X, Y et Z des points d'observation
- Niveau de l'eau en fonction du temps (il est possible d'avoir une seule valeur pour une seule journée)

Voici la procédure pour implémenter les points d'observation au modèle :

1. Passer en mode Carte
2. Clic droit dans la colonne de droite
3. *New Coverage*
4. Clic droit sur le *New Coverage*
5. *Properties*
6. Choisir le type *Observation*
7. *Properties*
8. Il ne reste plus qu'à ajouter les points

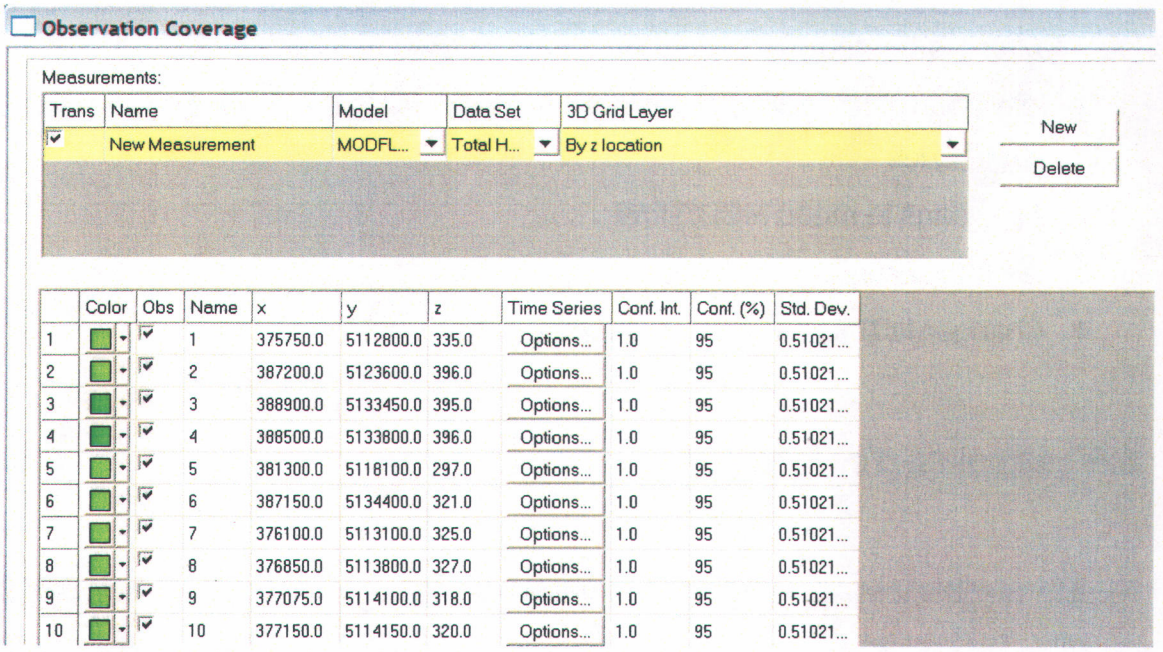


Figure C.20 : Caractéristiques des points d'observation

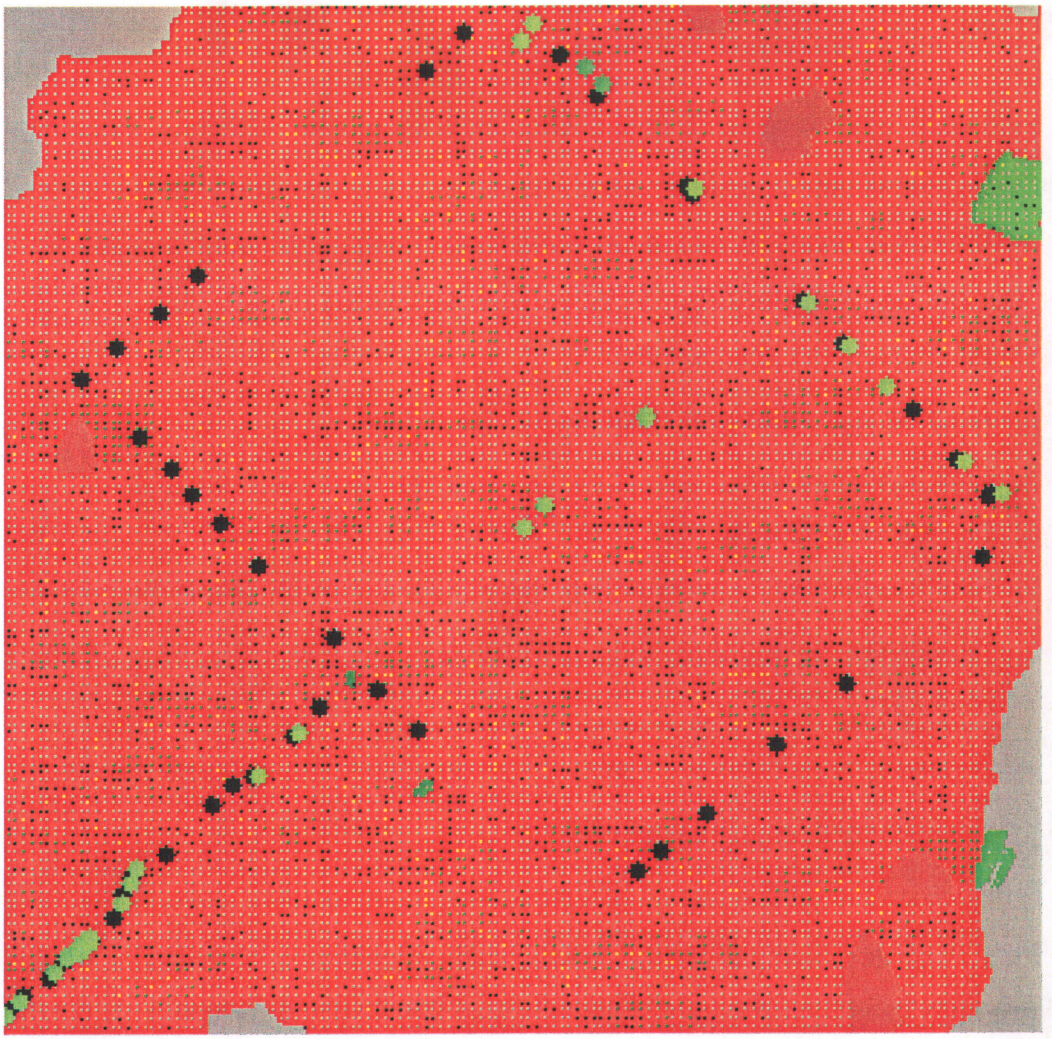


Figure C.21 : Points d'observation sur le terrain

7.0 Lancement de la simulation

Le modèle est normalement prêt à simuler pour la première fois. Mais avant de lancer la simulation, il faut s'assurer que tout ce que l'on a rentré soit correctement analysé. Il existe un outil fourni avec GMS pour évaluer les types d'erreur qui peuvent perturber le lancement des simulations :

1. Allez en mode *3D Grid*
2. Allez dans le menu *MODFLOW*
3. *Check Simulation ...*
4. Clic sur *Run Check*
5. Si le modèle est bien structuré, il n'y aura aucun message d'erreur
6. Si jamais il indique des « warning », il vous décrira comment les résoudre.

7.1 Paramétrage des simulations

Avant de lancer une simulation, il est possible de caractériser certains paramètres propres aux besoins définis par l'utilisateur, c'est-à-dire, par exemple, du nombre d'itérations, lesquels des fichiers de sortie à conserver.
Voici la procédure à suivre :

1. Allez dans le menu *MODFLOW*
2. *PCG2 Package*
3. Indiquer le nombre d'itérations : *Maximum outer iteration.*

D'un côté, plus le nombre d'itérations est élevé, plus la simulation est précise. D'un autre côté, plus la simulation sera longue, plus elle demandera une grande quantité de mémoire vive. Il est conseillé de mettre un nombre relativement modéré d'itérations au début pour valider le modèle. Par la suite, lorsque le modèle est calibré, il est préférable de refaire des simulations en augmentant le nombre d'itérations pour obtenir un résultat final plus raffiné.

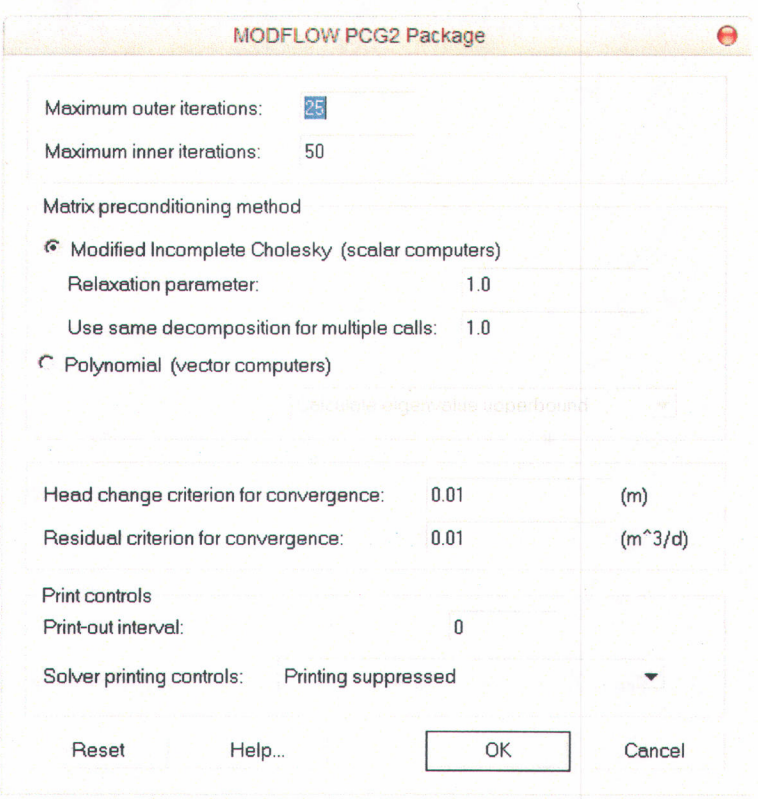


Figure C.22 : Caractérisations d'itération de la simulation

Il reste à présent à choisir ce qui va être sauvegardé :

1. Allez dans le menu *MODFLOW*
2. *Output Control…*

La seule option qui a une réelle influence sur les performances est le *Output interval*. Si on décide de sauvegarder les valeurs après chaque itération, on va obtenir un fichier de plusieurs GigaOctet, ce qui risque de rendre difficile sa lecture mais aussi de retrouver les informations voulues.

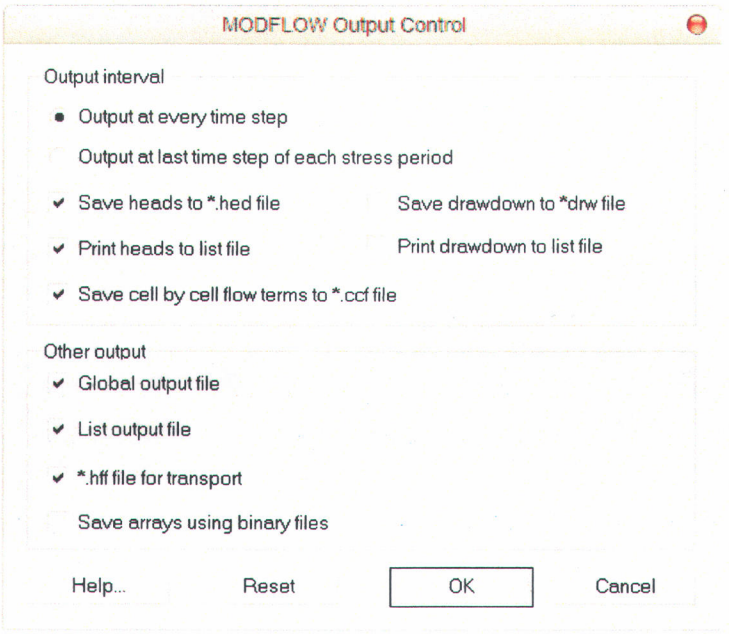


Figure C.23 : Paramètres de la sauvegarde d'information d'une simulation

7.2 Simulation

À présent pour lancer la simulation du modèle il faut simplement :

1. Allez dans le menu *MODFLOW*
2. *Run Simulation*

Il ne reste plus qu'à attendre que la simulation soit terminée.

8.0 Visualisation des résultats

Une fois la simulation finie, GMS charge la simulation. Les fichiers de sortie sont localisés dans la colonne de droite dans un nouveau dossier portant le nom de la simulation; on y retrouve quatre fichiers :

1. Un fichier *.glo indique les valeurs d'entré du modèle
2. Un fichier *.out répertorie les valeurs de sortie de MODFLOW durant la simulation
3. Un fichier _Heads représente le niveau d'eau après la simulation (les valeurs varient selon la période de la simulation)
4. Un fichier *.cff contient les données d'écoulement (interaction entre les couches) calculées durant la simulation

La première visualisation des valeurs peut se faire à partir du fichier _Heads. Il suffit de suivre la procédure :

1. Sélectionner le fichier _Heads
2. Clic droit sur le fichier _Heads
3. Propriété

Un graphique ainsi que différentes informations sont mis à disposition. On y retrouve les informations suivantes :

- Le nombre de périodes de temps
- La valeur maximum calculée
- La valeur minimum calculée
- La valeur moyenne
- L'écart entre la valeur maximum et minimum
- Un graphique qui représente la répartition des valeurs sur le modèle

GMS fournit un outil qui s'appelle le *Plot Wizard* offrant la possibilité de générer des graphiques en fonction des résultats de chaque simulation. Pour y accéder :

1. Aller dans le menu Display
2. *Plot Wizard*

On peut générer les graphiques suivants :

- Valeurs calculées versus observées : ce graphique permet de comparer les valeurs calculées par Modflow aux valeurs prises sur le terrain.
- Résiduelles versus observées : ce graphique permet de comparer la différence entre les valeurs calculées et observées.
- La sensibilité des paramètres : permet de voir l'analyse de sensibilité des différents paramètres du modèle.
- Les erreurs des hauteurs d'eau vis-à-vis la simulation : ce graphique permet de voir l'évolution des erreurs en fonction des différentes simulations.
- Les erreurs des hauteurs d'eau vis-à-vis des périodes de temps : permet de voir l'évolution des erreurs en fonction des périodes de temps.
- Un rapport d'erreur : il offre un résumé complet des différentes erreurs comme l'erreur moyenne et l'erreur absolue.
- Valeurs des séries temporelles : permet de voir l'évolution des valeurs calculées durant une période de temps pour un point d'observation.
- L'écoulement en fonction du temps : permet de voir l'évolution de l'écoulement sur les cellules choisies en fonction du temps.

Pour chacun de ces choix, GMS peut générer un graphique. Il est possible d'apporter plusieurs modifications comme la mise en page ou l'échelle. Il suffit de suivre ces étapes :

1. Clic droit sur le graphique
2. *Display Option*

Un menu apparaît qui nous offre les options suivantes :

- Les informations générales (titre)
- La représentation des valeurs
- Les axes
- La police des caractères
- Les couleurs
- Les styles

Une fois la mise en page finie, MODFLOW offre la possibilité d'imprimer ou de sauvegarder le graphique sous la forme d'une image. Pour ce faire :

1. Clic droit sur le graphique
2. Export/Print

Il ne reste qu'à choisir comment on veut sauvegarder le graphique et le tour est joué.

Annexe D- Points de contrôle pour la caractérisation de la stratigraphie

Voici la base de données utilisée pour la conceptualisation du modèle mathématique.

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
1	400874	5110435	0	-999	137	13
1	400874	5110435	1	-999	237	13
1	400874	5110435	2	-999	337	12
1	400874	5110435	3	-999	431	11
1	400874	5110435	6	-999	437	7
2	400874	5111081	0	-999	149	13
2	400874	5111081	1	-999	249	13
2	400874	5111081	2	-999	349	12
2	400874	5111081	3	-999	449	11
3	400833	5110148	4	-999	523	2
3	400833	5110148	0	-999	223	13
3	400833	5110148	1	-999	323	13
3	400833	5110148	3	-999	512	11
3	400833	5110148	2	-999	423	12
4	398987	5109091	1	-999	293	13
4	398987	5109091	0	-999	193	13
4	398987	5109091	2	-999	393	12
4	398987	5109091	3	-999	493	11
5	397500	5108500	3	-999	480	11
5	397500	5108500	0	-999	191	13
5	397500	5108500	1	-999	291	13
5	397500	5108500	4	-999	491	2
5	397500	5108500	2	-999	391	12
6	397438	5109748	3	-999	481	11
6	397438	5109748	2	-999	387	12
6	397438	5109748	1	-999	287	13
6	397438	5109748	6	-999	487	7
6	397438	5109748	0	-999	187	13
7	395150	5107550	2	-999	392	12
7	395150	5107550	1	-999	292	13
7	395150	5107550	3	-999	492	11
7	395150	5107550	0	-999	192	13
8	395700	5109700	6	-999	457	7
8	395700	5109700	3	-999	451	11
8	395700	5109700	2	-999	357	12
8	395700	5109700	1	-999	257	13
8	395700	5109700	0	-999	157	13
9	396258	5110445	4	-999	463	2
9	396258	5110445	1	-999	263	13
9	396258	5110445	0	-999	163	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
9	396258	5110445	3	-999	452	11
9	396258	5110445	2	-999	363	12
10	396090	5111090	6	-999	459	7
10	396090	5111090	3	-999	453	11
10	396090	5111090	2	-999	359	12
10	396090	5111090	1	-999	259	13
10	396090	5111090	0	-999	159	13
11	395020	5111080	6	-999	457	7
11	395020	5111080	3	-999	450	11
11	395020	5111080	2	-999	357	12
11	395020	5111080	1	-999	257	13
11	395020	5111080	0	-999	157	13
12	394330	5111204	1	-999	258	13
12	394330	5111204	0	-999	158	13
12	394330	5111204	3	-999	458	11
12	394330	5111204	2	-999	358	12
13	394700	5108900	0	-999	191	13
13	394700	5108900	3	-999	491	11
13	394700	5108900	2	-999	391	12
13	394700	5108900	1	-999	291	13
14	395195	5107550	2	-999	394	12
14	395195	5107550	1	-999	294	13
14	395195	5107550	0	-999	194	13
14	395195	5107550	3	-999	494	11
15	394955	5108168	3	-999	481	11
15	394955	5108168	1	-999	288	13
15	394955	5108168	0	-999	188	13
15	394955	5108168	4	-999	488	2
15	394955	5108168	2	-999	388	12
16	393100	5109090	1	-999	282	13
16	393100	5109090	0	-999	182	13
16	393100	5109090	2	-999	382	12
16	393100	5109090	4	-999	482	2
16	393100	5109090	3	-999	475	11
17	393030	5110080	2	-999	357	12
17	393030	5110080	3	-999	451	11
17	393030	5110080	6	-999	457	7
17	393030	5110080	0	-999	157	13
17	393030	5110080	1	-999	257	13
18	389216	5109476	2	-999	357	12
18	389216	5109476	3	-999	457	11
18	389216	5109476	0	-999	157	13
18	389216	5109476	1	-999	257	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
19	385922	5109250	2	-999	280	12
19	385922	5109250	1	-999	180	13
19	385922	5109250	3	-999	371	11
19	385922	5109250	4	-999	380	2
19	385922	5109250	0	-999	80	13
20	384190	5109410	2	-999	256	12
20	384190	5109410	3	-999	351	11
20	384190	5109410	4	-999	356	2
20	384190	5109410	0	-999	56	13
20	384190	5109410	1	-999	156	13
21	384196	5110141	1	-999	151	13
21	384196	5110141	0	-999	51	13
21	384196	5110141	6	-999	351	7
21	384196	5110141	3	-999	345	11
21	384196	5110141	2	-999	251	12
22	384400	5110400	3	-999	351	11
22	384400	5110400	4	-999	363	2
22	384400	5110400	0	-999	63	13
22	384400	5110400	2	-999	263	12
22	384400	5110400	1	-999	163	13
23	385000	5110500	0	-999	79	13
23	385000	5110500	2	-999	279	12
23	385000	5110500	1	-999	179	13
23	385000	5110500	3	-999	379	11
24	385600	5110000	2	-999	273	12
24	385600	5110000	1	-999	173	13
24	385600	5110000	3	-999	367	11
24	385600	5110000	4	-999	373	2
24	385600	5110000	0	-999	73	13
25	385346	5109668	1	-999	165	13
25	385346	5109668	2	-999	265	12
25	385346	5109668	3	-999	359	11
25	385346	5109668	6	-999	365	7
25	385346	5109668	0	-999	65	13
26	386200	5110700	2	-999	296	12
26	386200	5110700	1	-999	196	13
26	386200	5110700	3	-999	390	11
26	386200	5110700	4	-999	396	2
26	386200	5110700	0	-999	96	13
27	386226	5110435	0	-999	91	13
27	386226	5110435	1	-999	191	13
27	386226	5110435	2	-999	291	12

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
27	386226	5110435	3	-999	391	11
28	386599	5109825	3	-999	383	11
28	386599	5109825	2	-999	289	12
28	386599	5109825	0	-999	89	13
28	386599	5109825	1	-999	189	13
28	386599	5109825	6	-999	389	7
29	387445	5110604	3	-999	389	11
29	387445	5110604	2	-999	297	12
29	387445	5110604	1	-999	197	13
29	387445	5110604	0	-999	97	13
29	387445	5110604	4	-999	397	2
30	388156	5110784	0	-999	100	13
30	388156	5110784	1	-999	200	13
30	388156	5110784	3	-999	394	11
30	388156	5110784	2	-999	300	12
30	388156	5110784	6	-999	400	7
31	388336	5110672	0	-999	103	13
31	388336	5110672	1	-999	203	13
31	388336	5110672	2	-999	303	12
31	388336	5110672	4	-999	403	2
31	388336	5110672	3	-999	395	11
32	388370	5110401	3	-999	417	11
32	388370	5110401	2	-999	317	12
32	388370	5110401	1	-999	217	13
32	388370	5110401	0	-999	117	13
33	389080	5111040	1	-999	196	13
33	389080	5111040	0	-999	96	13
33	389080	5111040	2	-999	296	12
33	389080	5111040	3	-999	382	11
33	389080	5111040	4	-999	396	2
34	390051	5110232	2	-999	356	12
34	390051	5110232	1	-999	256	13
34	390051	5110232	0	-999	156	13
34	390051	5110232	3	-999	456	11
35	390886	5111721	6	-999	441	7
35	390886	5111721	3	-999	435	11
35	390886	5111721	1	-999	241	13
35	390886	5111721	0	-999	141	13
35	390886	5111721	2	-999	341	12
36	391822	5112217	1	-999	245	13
36	391822	5112217	0	-999	145	13
36	391822	5112217	2	-999	345	12
36	391822	5112217	4	-999	445	2

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
36	391822	5112217	3	-999	435	11
37	391021	5112657	6	-999	414	7
37	391021	5112657	3	-999	408	11
37	391021	5112657	2	-999	314	12
37	391021	5112657	1	-999	214	13
37	391021	5112657	0	-999	114	13
38	390683	5112330	1	-999	218	13
38	390683	5112330	0	-999	118	13
38	390683	5112330	2	-999	318	12
38	390683	5112330	3	-999	418	11
39	392100	5113020	0	-999	149	13
39	392100	5113020	1	-999	249	13
39	392100	5113020	2	-999	349	12
39	392100	5113020	4	-999	449	2
39	392100	5113020	3	-999	443	11
40	392750	5113450	1	-999	255	13
40	392750	5113450	0	-999	155	13
40	392750	5113450	3	-999	451	11
40	392750	5113450	4	-999	455	2
40	392750	5113450	2	-999	355	12
41	395050	5113050	3	-999	442	11
41	395050	5113050	0	-999	153	13
41	395050	5113050	1	-999	253	13
41	395050	5113050	6	-999	453	7
41	395050	5113050	2	-999	353	12
42	394000	5113900	1	-999	255	13
42	394000	5113900	0	-999	155	13
42	394000	5113900	3	-999	455	11
42	394000	5113900	2	-999	355	12
43	395700	5114300	0	-999	157	13
43	395700	5114300	4	-999	457	2
43	395700	5114300	3	-999	444	11
43	395700	5114300	2	-999	357	12
43	395700	5114300	1	-999	257	13
44	395100	5114600	3	-999	425	11
44	395100	5114600	1	-999	243	13
44	395100	5114600	2	-999	343	12
44	395100	5114600	0	-999	143	13
44	395100	5114600	4	-999	443	2
45	395500	5114700	3	-999	447	11
45	395500	5114700	2	-999	357	12
45	395500	5114700	1	-999	257	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
45	395500	5114700	0	-999	157	13
45	395500	5114700	4	-999	457	2
46	395400	5115300	3	-999	430	11
46	395400	5115300	0	-999	130	13
46	395400	5115300	1	-999	230	13
46	395400	5115300	2	-999	330	12
47	396662	5114564	3	-999	476	11
47	396662	5114564	0	-999	176	13
47	396662	5114564	2	-999	376	12
47	396662	5114564	1	-999	276	13
48	396199	5115850	0	-999	126	13
48	396199	5115850	6	-999	426	7
48	396199	5115850	3	-999	420	11
48	396199	5115850	2	-999	326	12
48	396199	5115850	1	-999	226	13
49	394030	5116080	2	-999	357	12
49	394030	5116080	1	-999	257	13
49	394030	5116080	0	-999	157	13
49	394030	5116080	4	-999	457	2
49	394030	5116080	3	-999	452	11
50	393289	5115387	3	-999	390	11
50	393289	5115387	1	-999	196	13
50	393289	5115387	0	-999	96	13
50	393289	5115387	2	-999	296	12
50	393289	5115387	6	-999	396	7
51	390807	5115455	3	-999	361	11
51	390807	5115455	0	-999	67	13
51	390807	5115455	2	-999	267	12
51	390807	5115455	1	-999	167	13
51	390807	5115455	4	-999	367	2
52	390119	5116188	3	-999	359	11
52	390119	5116188	6	-999	365	7
52	390119	5116188	2	-999	265	12
52	390119	5116188	0	-999	65	13
52	390119	5116188	1	-999	165	13
53	389450	5115700	2	-999	260	12
53	389450	5115700	0	-999	60	13
53	389450	5115700	1	-999	160	13
53	389450	5115700	4	-999	360	2
53	389450	5115700	3	-999	344	11
54	388400	5114900	4	-999	357	2
54	388400	5114900	0	-999	57	13
54	388400	5114900	1	-999	157	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
54	388400	5114900	3	-999	350	11
54	388400	5114900	2	-999	257	12
55	386554	5114925	2	-999	228	12
55	386554	5114925	1	-999	128	13
55	386554	5114925	0	-999	28	13
55	386554	5114925	3	-999	323	11
55	386554	5114925	4	-999	328	2
56	385200	5115620	2	-999	204	12
56	385200	5115620	4	-999	304	2
56	385200	5115620	3	-999	294	11
56	385200	5115620	0	-999	4	13
56	385200	5115620	1	-999	104	13
57	384342	5113774	6	-999	304	7
57	384342	5113774	3	-999	298	11
57	384342	5113774	2	-999	204	12
57	384342	5113774	1	-999	104	13
57	384342	5113774	0	-999	4	13
58	384920	5113820	1	-999	120	13
58	384920	5113820	0	-999	20	13
58	384920	5113820	3	-999	320	11
58	384920	5113820	2	-999	220	12
59	384444	5112962	3	-999	330	11
59	384444	5112962	2	-999	230	12
59	384444	5112962	1	-999	130	13
59	384444	5112962	0	-999	30	13
60	385662	5113672	4	-999	332	2
60	385662	5113672	1	-999	132	13
60	385662	5113672	3	-999	322	11
60	385662	5113672	0	-999	32	13
60	385662	5113672	2	-999	232	12
61	385888	5113357	3	-999	357	11
61	385888	5113357	0	-999	57	13
61	385888	5113357	1	-999	157	13
61	385888	5113357	2	-999	257	12
62	386373	5112375	0	-999	77	13
62	386373	5112375	3	-999	369	11
62	386373	5112375	4	-999	377	2
62	386373	5112375	1	-999	177	13
62	386373	5112375	2	-999	277	12
63	385200	5114900	3	-999	298	11
63	385200	5114900	2	-999	204	12
63	385200	5114900	1	-999	104	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
63	385200	5114900	0	-999	4	13
63	385200	5114900	6	-999	304	7
65	385200	5116000	4	-999	304	2
65	385200	5116000	1	-999	104	13
65	385200	5116000	3	-999	296	11
65	385200	5116000	0	-999	4	13
65	385200	5116000	2	-999	204	12
66	385258	5116200	1	-999	104	13
66	385258	5116200	2	-999	204	12
66	385258	5116200	6	-999	304	7
66	385258	5116200	3	-999	299	11
66	385258	5116200	0	-999	4	13
67	385561	5116109	1	-999	106	13
67	385561	5116109	2	-999	206	12
67	385561	5116109	3	-999	306	11
67	385561	5116109	0	-999	6	13
68	386960	5115026	0	-999	34	13
68	386960	5115026	1	-999	134	13
68	386960	5115026	2	-999	234	12
68	386960	5115026	4	-999	334	2
68	386960	5115026	3	-999	328	11
69	387603	5116628	2	-999	233	12
69	387603	5116628	3	-999	328	11
69	387603	5116628	6	-999	333	7
69	387603	5116628	1	-999	133	13
69	387603	5116628	0	-999	33	13
70	394100	5114100	0	446	148	13
70	394100	5114100	3	446	448	11
70	394100	5114100	2	446	348	12
70	394100	5114100	1	446	248	13
71	385510	5117590	0	-999	35	13
71	385510	5117590	1	-999	135	13
71	385510	5117590	2	-999	235	12
71	385510	5117590	3	-999	335	11
72	385450	5117800	1	-999	126	13
72	385450	5117800	2	-999	226	12
72	385450	5117800	3	-999	323	11
72	385450	5117800	4	-999	326	2
72	385450	5117800	0	-999	26	13
73	385500	5118000	2	-999	220	12
73	385500	5118000	1	-999	120	13
73	385500	5118000	0	-999	20	13
73	385500	5118000	4	-999	320	2

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
73	385500	5118000	3	-999	311	11
74	385090	5118050	3	-999	284	11
74	385090	5118050	2	-999	228	12
74	385090	5118050	1	-999	128	13
74	385090	5118050	0	-999	28	13
74	385090	5118050	4	-999	328	2
75	385000	5118210	1	-999	133	13
75	385000	5118210	0	-999	33	13
75	385000	5118210	2	-999	233	12
75	385000	5118210	3	-999	333	11
76	384500	5118800	2	-999	205	12
76	384500	5118800	3	-999	299	11
76	384500	5118800	1	-999	105	13
76	384500	5118800	0	-999	5	13
76	384500	5118800	4	-999	305	2
77	384490	5119490	4	-999	286	2
77	384490	5119490	3	-999	282	11
77	384490	5119490	2	-999	186	12
77	384490	5119490	1	-999	86	13
77	384490	5119490	0	-999	-14	13
78	384829	5120091	2	-999	178	12
78	384829	5120091	6	-999	278	7
78	384829	5120091	1	-999	78	13
78	384829	5120091	3	-999	272	11
78	384829	5120091	0	-999	-22	13
79	385756	5119490	6	-999	280	7
79	385756	5119490	3	-999	274	11
79	385756	5119490	2	-999	180	12
79	385756	5119490	1	-999	80	13
79	385756	5119490	0	-999	-20	13
80	386006	5119327	6	-999	301	7
80	386006	5119327	3	-999	295	11
80	386006	5119327	2	-999	201	12
80	386006	5119327	1	-999	101	13
80	386006	5119327	0	-999	1	13
81	386106	5118926	3	-999	290	11
81	386106	5118926	0	-999	3	13
81	386106	5118926	2	-999	203	12
81	386106	5118926	4	-999	303	2
81	386106	5118926	1	-999	103	13
82	386582	5118613	6	-999	304	7
82	386582	5118613	3	-999	299	11

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
82	386582	5118613	1	-999	104	13
82	386582	5118613	0	-999	4	13
82	386582	5118613	2	-999	204	12
83	387300	5117200	4	-999	323	2
83	387300	5117200	3	-999	309	11
83	387300	5117200	2	-999	223	12
83	387300	5117200	0	-999	23	13
83	387300	5117200	1	-999	123	13
84	386860	5119510	1	-999	111	13
84	386860	5119510	0	-999	11	13
84	386860	5119510	2	-999	211	12
84	386860	5119510	4	-999	311	2
84	386860	5119510	3	-999	306	11
85	385100	5121700	4	-999	304	2
85	385100	5121700	3	-999	299	11
85	385100	5121700	2	-999	204	12
85	385100	5121700	1	-999	104	13
85	385100	5121700	0	-999	4	13
86	386795	5121431	4	-999	306	2
86	386795	5121431	2	-999	206	12
86	386795	5121431	3	-999	301	11
86	386795	5121431	0	-999	6	13
86	386795	5121431	1	-999	106	13
87	387040	5121050	0	-999	12	13
87	387040	5121050	1	-999	112	13
87	387040	5121050	2	-999	212	12
87	387040	5121050	6	-999	312	7
87	387040	5121050	3	-999	309	11
88	388060	5121070	1	-999	121	13
88	388060	5121070	6	-999	321	7
88	388060	5121070	3	-999	311	11
88	388060	5121070	0	-999	21	13
88	388060	5121070	2	-999	221	12
89	387521	5120842	2	-999	219	12
89	387521	5120842	0	-999	19	13
89	387521	5120842	4	-999	319	2
89	387521	5120842	1	-999	119	13
89	387521	5120842	3	-999	314	11
90	386958	5120529	3	-999	315	11
90	386958	5120529	2	-999	215	12
90	386958	5120529	1	-999	115	13
90	386958	5120529	0	-999	15	13
91	388423	5119991	1	-999	135	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
91	388423	5119991	2	-999	235	12
91	388423	5119991	3	-999	335	11
91	388423	5119991	0	-999	35	13
92	387050	5120080	4	-999	317	2
92	387050	5120080	3	-999	296	11
92	387050	5120080	2	-999	217	12
92	387050	5120080	1	-999	117	13
92	387050	5120080	0	-999	17	13
93	387410	5119940	2	-999	234	12
93	387410	5119940	1	-999	134	13
93	387410	5119940	3	-999	329	11
93	387410	5119940	4	-999	334	2
93	387410	5119940	0	-999	34	13
94	387800	5119400	3	-999	330	11
94	387800	5119400	2	-999	230	12
94	387800	5119400	1	-999	130	13
94	387800	5119400	0	-999	30	13
95	387534	5119014	2	-999	219	12
95	387534	5119014	0	-999	19	13
95	387534	5119014	4	-999	319	2
95	387534	5119014	3	-999	311	11
95	387534	5119014	1	-999	119	13
96	387760	5118250	3	-999	322	11
96	387760	5118250	1	-999	122	13
96	387760	5118250	0	-999	22	13
96	387760	5118250	2	-999	222	12
98	388523	5116948	2	-999	235	12
98	388523	5116948	6	-999	335	7
98	388523	5116948	1	-999	135	13
98	388523	5116948	3	-999	329	11
98	388523	5116948	0	-999	35	13
99	391027	5117010	4	-999	370	2
99	391027	5117010	3	-999	364	11
99	391027	5117010	2	-999	270	12
99	391027	5117010	1	-999	170	13
99	391027	5117010	0	-999	70	13
100	390676	5118351	0	-999	72	13
100	390676	5118351	3	-999	372	11
100	390676	5118351	2	-999	272	12
100	390676	5118351	1	-999	172	13
101	391252	5119365	6	-999	349	7
101	391252	5119365	3	-999	342	11

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
101	391252	5119365	1	-999	149	13
101	391252	5119365	0	-999	49	13
101	391252	5119365	2	-999	249	12
102	390380	5120330	4	-999	335	2
102	390380	5120330	3	-999	321	11
102	390380	5120330	2	-999	235	12
102	390380	5120330	1	-999	135	13
102	390380	5120330	0	-999	35	13
103	387897	5122495	2	-999	204	12
103	387897	5122495	1	-999	104	13
103	387897	5122495	3	-999	297	11
103	387897	5122495	6	-999	304	7
103	387897	5122495	0	-999	4	13
104	392404	5121067	6	-999	342	7
104	392404	5121067	3	-999	336	11
104	392404	5121067	2	-999	242	12
104	392404	5121067	1	-999	142	13
104	392404	5121067	0	-999	42	13
105	394200	5120300	4	-999	372	2
105	394200	5120300	3	-999	366	11
105	394200	5120300	2	-999	272	12
105	394200	5120300	1	-999	172	13
105	394200	5120300	0	-999	72	13
106	388848	5120880	0	-999	33	13
106	388848	5120880	2	-999	233	12
106	388848	5120880	1	-999	133	13
106	388848	5120880	3	-999	326	11
106	388848	5120880	5	-999	333	3
107	389825	5121731	6	-999	319	7
107	389825	5121731	3	-999	313	11
107	389825	5121731	2	-999	219	12
107	389825	5121731	1	-999	119	13
107	389825	5121731	0	-999	19	13
108	399850	5120567	5	-999	428	3
108	399850	5120567	0	-999	128	13
108	399850	5120567	1	-999	228	13
108	399850	5120567	2	-999	328	12
108	399850	5120567	3	-999	421	11
109	389988	5120491	3	-999	326	11
109	389988	5120491	2	-999	236	12
109	389988	5120491	1	-999	136	13
109	389988	5120491	0	-999	36	13
109	389988	5120491	4	-999	336	2

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
110	391100	5120100	5	-999	335	3
110	391100	5120100	3	-999	331	11
110	391100	5120100	2	-999	235	12
110	391100	5120100	1	-999	135	13
110	391100	5120100	0	-999	35	13
111	391953	5118664	1	-999	164	13
111	391953	5118664	0	-999	64	13
111	391953	5118664	3	-999	359	11
111	391953	5118664	5	-999	364	3
111	391953	5118664	2	-999	264	12
112	392529	5118914	3	-999	360	11
112	392529	5118914	2	-999	267	12
112	392529	5118914	1	-999	167	13
112	392529	5118914	0	-999	67	13
112	392529	5118914	4	-999	367	2
113	393080	5119180	5	-999	375	3
113	393080	5119180	3	-999	368	11
113	393080	5119180	2	-999	275	12
113	393080	5119180	1	-999	175	13
113	393080	5119180	0	-999	75	13
114	393393	5121143	2	-999	256	12
114	393393	5121143	1	-999	156	13
114	393393	5121143	3	-999	348	11
114	393393	5121143	6	-999	356	7
114	393393	5121143	0	-999	56	13
115	394080	5121020	4	-999	368	2
115	394080	5121020	3	-999	358	11
115	394080	5121020	2	-999	268	12
115	394080	5121020	1	-999	168	13
115	394080	5121020	0	-999	68	13
116	396080	5120090	4	-999	422	2
116	396080	5120090	3	-999	416	11
116	396080	5120090	2	-999	322	12
116	396080	5120090	1	-999	222	13
116	396080	5120090	0	-999	122	13
117	398176	5121831	3	-999	457	11
117	398176	5121831	0	-999	157	13
117	398176	5121831	2	-999	357	12
117	398176	5121831	1	-999	257	13
118	397625	5121205	4	-999	442	2
118	397625	5121205	3	-999	434	11
118	397625	5121205	2	-999	342	12

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
118	397625	5121205	1	-999	242	13
118	397625	5121205	0	-999	142	13
119	397074	5120291	2	-999	348	12
119	397074	5120291	1	-999	248	13
119	397074	5120291	3	-999	448	11
119	397074	5120291	0	-999	148	13
120	396386	5119377	0	-999	151	13
120	396386	5119377	4	-999	451	2
120	396386	5119377	3	-999	445	11
120	396386	5119377	2	-999	351	12
120	396386	5119377	1	-999	251	13
121	396248	5118551	0	-999	157	13
121	396248	5118551	1	-999	257	13
121	396248	5118551	3	-999	457	11
121	396248	5118551	2	-999	357	12
122	396436	5117712	4	-999	461	2
122	396436	5117712	3	-999	455	11
122	396436	5117712	2	-999	361	12
122	396436	5117712	1	-999	261	13
122	396436	5117712	0	-999	161	13
123	395797	5117149	3	-999	469	11
123	395797	5117149	2	-999	369	12
123	395797	5117149	1	-999	269	13
123	395797	5117149	0	-999	169	13
124	397100	5141220	3	425	422	11
124	397100	5141220	0	425	127	13
124	397100	5141220	4	425	427	2
124	397100	5141220	1	425	227	13
124	397100	5141220	2	425	327	12
125	401030	5126100	4	-999	426	2
125	401030	5126100	3	-999	420	11
125	401030	5126100	2	-999	326	12
125	401030	5126100	1	-999	226	13
125	401030	5126100	0	-999	126	13
126	399325	5126033	3	-999	426	11
126	399325	5126033	2	-999	326	12
126	399325	5126033	1	-999	226	13
126	399325	5126033	0	-999	126	13
127	402364	5126318	2	-999	327	12
127	402364	5126318	1	-999	227	13
127	402364	5126318	3	-999	427	11
127	402364	5126318	0	-999	127	13
128	403165	5126977	4	-999	405	2

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
128	403165	5126977	3	-999	399	11
128	403165	5126977	2	-999	305	12
128	403165	5126977	1	-999	205	13
128	403165	5126977	0	-999	105	13
129	400090	5126700	0	-999	100	13
129	400090	5126700	4	-999	400	2
129	400090	5126700	3	-999	394	11
129	400090	5126700	2	-999	300	12
129	400090	5126700	1	-999	200	13
130	397262	5128184	2	-999	285	12
130	397262	5128184	0	-999	85	13
130	397262	5128184	6	-999	385	7
130	397262	5128184	3	-999	379	11
130	397262	5128184	1	-999	185	13
131	399829	5127361	6	-999	396	7
131	399829	5127361	3	-999	390	11
131	399829	5127361	1	-999	196	13
131	399829	5127361	0	-999	96	13
131	399829	5127361	2	-999	296	12
132	400510	5127866	2	-999	320	12
132	400510	5127866	1	-999	220	13
132	400510	5127866	0	-999	120	13
132	400510	5127866	3	-999	420	11
133	401421	5128381	1	-999	207	13
133	401421	5128381	0	-999	107	13
133	401421	5128381	2	-999	307	12
133	401421	5128381	3	-999	400	11
133	401421	5128381	6	-999	407	7
134	402375	5128535	2	-999	308	12
134	402375	5128535	1	-999	208	13
134	402375	5128535	0	-999	108	13
134	402375	5128535	3	-999	408	11
135	402935	5128831	6	-999	410	7
135	402935	5128831	3	-999	402	11
135	402935	5128831	2	-999	310	12
135	402935	5128831	1	-999	210	13
135	402935	5128831	0	-999	110	13
136	400290	5129731	1	-999	226	13
136	400290	5129731	3	-999	424	11
136	400290	5129731	2	-999	326	12
136	400290	5129731	4	-999	426	2
136	400290	5129731	0	-999	126	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
137	398864	5128579	1	-999	222	13
137	398864	5128579	0	-999	122	213
137	398864	5128579	3	-999	422	11
137	398864	5128579	2	-999	322	12
138	398500	5128600	4	-999	410	2
138	398500	5128600	3	-999	396	11
138	398500	5128600	2	-999	310	12
138	398500	5128600	1	-999	210	13
138	398500	5128600	0	-999	110	13
139	397360	5128634	0	-999	89	13
139	397360	5128634	1	-999	189	13
139	397360	5128634	2	-999	289	12
139	397360	5128634	3	-999	382	11
139	397360	5128634	6	-999	389	7
140	400038	5131827	6	-999	396	7
140	400038	5131827	3	-999	389	11
140	400038	5131827	2	-999	296	12
140	400038	5131827	1	-999	196	13
140	400038	5131827	0	-999	96	13
141	398300	5130800	4	-999	396	2
141	398300	5130800	3	-999	356	11
141	398300	5130800	2	-999	296	12
141	398300	5130800	0	-999	96	13
141	398300	5130800	1	-999	196	13
142	396482	5128798	4	-999	379	2
142	396482	5128798	3	-999	369	11
142	396482	5128798	2	-999	279	12
142	396482	5128798	1	-999	179	13
142	396482	5128798	0	-999	79	13
143	395934	5129095	1	-999	180	13
143	395934	5129095	6	-999	380	7
143	395934	5129095	0	-999	80	13
143	395934	5129095	2	-999	280	12
143	395934	5129095	3	-999	373	11
144	395517	5131992	3	-999	386	11
144	395517	5131992	2	-999	294	12
144	395517	5131992	1	-999	194	13
144	395517	5131992	0	-999	94	13
144	395517	5131992	6	-999	394	7
145	396910	5132299	1	-999	206	13
145	396910	5132299	0	-999	106	13
145	396910	5132299	4	-999	406	2
145	396910	5132299	3	-999	400	11

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
145	396910	5132299	2	-999	306	12
146	399200	5133400	1	-999	215	13
146	399200	5133400	0	-999	115	13
146	399200	5133400	3	-999	415	11
146	399200	5133400	2	-999	315	12
147	393739	5133791	6	-999	396	7
147	393739	5133791	3	-999	388	11
147	393739	5133791	2	-999	296	12
147	393739	5133791	1	-999	196	13
147	393739	5133791	0	-999	96	13
148	393212	5133660	4	-999	403	2
148	393212	5133660	0	-999	103	13
148	393212	5133660	1	-999	203	13
148	393212	5133660	3	-999	395	11
148	393212	5133660	2	-999	303	12
149	391820	5133800	2	-999	312	12
149	391820	5133800	0	-999	112	13
149	391820	5133800	1	-999	212	13
149	391820	5133800	3	-999	412	11
150	395659	5134263	6	-999	404	7
150	395659	5134263	3	-999	396	11
150	395659	5134263	2	-999	304	12
150	395659	5134263	1	-999	204	13
150	395659	5134263	0	-999	104	13
151	396362	5135053	0	-999	108	13
151	396362	5135053	4	-999	408	2
151	396362	5135053	3	-999	398	11
151	396362	5135053	2	-999	308	12
151	396362	5135053	1	-999	208	13
152	395725	5136227	0	-999	99	13
152	395725	5136227	1	-999	199	13
152	395725	5136227	2	-999	299	12
152	395725	5136227	6	-999	399	7
152	395725	5136227	3	-999	392	11
153	393684	5134932	0	-999	126	13
153	393684	5134932	3	-999	426	11
153	393684	5134932	2	-999	326	12
153	393684	5134932	1	-999	226	13
154	391062	5133243	0	-999	95	13
154	391062	5133243	3	-999	387	11
154	391062	5133243	2	-999	295	12
154	391062	5133243	1	-999	195	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
154	391062	5133243	6	-999	395	7
155	390720	5134800	4	-999	396	2
155	390720	5134800	3	-999	394	11
155	390720	5134800	2	-999	296	12
155	390720	5134800	1	-999	196	13
155	390720	5134800	0	-999	96	13
156	390008	5135009	0	-999	96	13
156	390008	5135009	3	-999	396	11
156	390008	5135009	2	-999	296	12
156	390008	5135009	1	-999	196	13
157	389150	5135350	3	-999	317	11
157	389150	5135350	2	-999	235	12
157	389150	5135350	1	-999	135	13
157	389150	5135350	0	-999	35	13
157	389150	5135350	6	-999	335	7
158	389450	5135500	3	333	316	11
158	389450	5135500	2	333	235	12
158	389450	5135500	1	333	135	13
158	389450	5135500	0	333	35	13
158	389450	5135500	6	333	335	7
161	390370	5135570	5	-999	382	3
161	390370	5135570	3	-999	376	11
161	390370	5135570	2	-999	282	12
161	390370	5135570	1	-999	182	13
161	390370	5135570	0	-999	82	13
163	390500	5136400	0	-999	71	13
163	390500	5136400	5	-999	371	3
163	390500	5136400	3	-999	348	11
163	390500	5136400	1	-999	171	13
163	390500	5136400	2	-999	271	12
165	391182	5136183	2	-999	296	12
165	391182	5136183	3	-999	396	11
165	391182	5136183	1	-999	196	13
165	391182	5136183	0	-999	96	13
166	392300	5137300	3	-999	403	11
166	392300	5137300	4	-999	405	2
166	392300	5137300	1	-999	205	13
166	392300	5137300	0	-999	105	13
166	392300	5137300	2	-999	305	12
167	393110	5137000	3	-999	442	11
167	393110	5137000	2	-999	342	12
167	393110	5137000	1	-999	242	13
167	393110	5137000	0	-999	142	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
168	388550	5137000	3	-999	386	11
168	388550	5137000	2	-999	288	12
168	388550	5137000	1	-999	188	13
168	388550	5137000	0	-999	88	13
168	388550	5137000	4	-999	388	2
169	393882	5138598	0	-999	126	13
169	393882	5138598	1	-999	226	13
169	393882	5138598	2	-999	326	12
169	393882	5138598	3	-999	426	11
170	393700	5140000	1	-999	195	13
170	393700	5140000	2	-999	295	12
170	393700	5140000	3	-999	387	11
170	393700	5140000	6	-999	395	7
170	393700	5140000	0	-999	95	13
171	393827	5139256	3	-999	392	11
171	393827	5139256	2	-999	294	12
171	393827	5139256	1	-999	194	13
171	393827	5139256	0	-999	94	13
171	393827	5139256	4	-999	394	2
173	396834	5142822	6	-999	396	7
173	396834	5142822	0	-999	96	13
173	396834	5142822	3	-999	388	11
173	396834	5142822	2	-999	296	12
173	396834	5142822	1	-999	196	13
174	393882	5141451	0	-999	124	13
174	393882	5141451	1	-999	224	13
174	393882	5141451	2	-999	324	12
174	393882	5141451	4	-999	424	2
174	393882	5141451	3	-999	422	11
175	392565	5141506	2	-999	360	12
175	392565	5141506	1	-999	260	13
175	392565	5141506	0	-999	160	13
175	392565	5141506	3	-999	460	11
176	375686	5121233	3	-999	299	11
176	375686	5121233	2	-999	202	12
176	375686	5121233	0	-999	2	13
176	375686	5121233	6	-999	302	7
176	375686	5121233	1	-999	102	13
177	376346	5121326	0	-999	-6	13
177	376346	5121326	2	-999	194	12
177	376346	5121326	3	-999	291	11
177	376346	5121326	4	-999	294	2

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
177	376346	5121326	1	-999	94	13
178	376126	5120438	1	-999	74	13
178	376126	5120438	0	-999	-26	13
178	376126	5120438	2	-999	174	12
178	376126	5120438	3	-999	270	11
178	376126	5120438	6	-999	274	7
179	376709	5122206	2	-999	205	12
179	376709	5122206	0	-999	5	13
179	376709	5122206	4	-999	305	2
179	376709	5122206	1	-999	105	13
179	376709	5122206	3	-999	303	11
180	377657	5121605	6	-999	294	7
180	377657	5121605	0	-999	-6	13
180	377657	5121605	1	-999	94	13
180	377657	5121605	2	-999	194	12
180	377657	5121605	3	-999	290	11
181	378147	5121385	0	-999	-14	13
181	378147	5121385	4	-999	286	2
181	378147	5121385	3	-999	280	11
181	378147	5121385	2	-999	186	12
181	378147	5121385	1	-999	86	13
182	380380	5122645	3	-999	280	11
182	380380	5122645	2	-999	184	12
182	380380	5122645	0	-999	-16	13
182	380380	5122645	6	-999	284	7
182	380380	5122645	1	-999	84	13
183	379162	5120819	6	-999	274	7
183	379162	5120819	0	-999	-26	13
183	379162	5120819	3	-999	270	11
183	379162	5120819	1	-999	74	13
183	379162	5120819	2	-999	174	12
184	378519	5119593	1	-999	44	13
184	378519	5119593	0	-999	-56	13
184	378519	5119593	2	-999	144	12
184	378519	5119593	6	-999	244	7
184	378519	5119593	3	-999	237	11
185	379289	5119999	0	-999	-26	13
185	379289	5119999	1	-999	74	13
185	379289	5119999	2	-999	174	12
185	379289	5119999	3	-999	268	11
185	379289	5119999	4	-999	274	2
186	378874	5118011	1	-999	65	13
186	378874	5118011	2	-999	165	12

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
186	378874	5118011	3	-999	255	11
186	378874	5118011	4	-999	265	2
186	378874	5118011	0	-999	-35	13
187	379703	5119178	3	-999	254	11
187	379703	5119178	6	-999	261	7
187	379703	5119178	2	-999	161	12
187	379703	5119178	0	-999	-39	13
187	379703	5119178	1	-999	61	13
188	382720	5121820	3	-999	304	11
188	382720	5121820	0	-999	4	13
188	382720	5121820	1	-999	104	13
188	382720	5121820	2	-999	204	12
189	382750	5121200	3	-999	299	11
189	382750	5121200	2	-999	204	12
189	382750	5121200	4	-999	304	2
189	382750	5121200	1	-999	104	13
189	382750	5121200	0	-999	4	13
190	383100	5120900	2	-999	196	12
190	383100	5120900	1	-999	96	13
190	383100	5120900	3	-999	296	11
190	383100	5120900	0	-999	-4	13
191	383790	5120280	6	-999	274	7
191	383790	5120280	4	-999	250	2
191	383790	5120280	2	-999	174	12
191	383790	5120280	1	-999	74	13
191	383790	5120280	0	-999	-26	13
191	383790	5120280	3	-999	240	11
192	383847	5121191	0	-999	-1	13
192	383847	5121191	1	-999	99	13
192	383847	5121191	2	-999	199	12
192	383847	5121191	3	-999	291	11
192	383847	5121191	6	-999	299	7
193	383600	5119800	4	-999	275	2
193	383600	5119800	1	-999	75	13
193	383600	5119800	0	-999	-25	13
193	383600	5119800	2	-999	175	12
193	383600	5119800	3	-999	251	11
194	383000	5120000	2	-999	174	12
194	383000	5120000	6	-999	274	7
194	383000	5120000	4	-999	268	2
194	383000	5120000	1	-999	74	13
194	383000	5120000	3	-999	250	11

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
194	383000	5120000	0	-999	-26	13
195	382090	5119590	0	270	-26	13
195	382090	5119590	4	270	274	2
195	382090	5119590	1	270	74	13
195	382090	5119590	2	270	174	12
195	382090	5119590	3	270	261	11
196	380582	5117825	6	-999	300	7
196	380582	5117825	4	-999	294	2
196	380582	5117825	2	-999	200	12
196	380582	5117825	1	-999	100	13
196	380582	5117825	0	-999	0	13
196	380582	5117825	3	-999	279	11
197	380350	5117650	3	-999	277	11
197	380350	5117650	2	-999	189	12
197	380350	5117650	1	-999	89	13
197	380350	5117650	0	-999	-11	13
197	380350	5117650	4	-999	289	2
198	383052	5118350	6	-999	277	7
198	383052	5118350	0	-999	-23	13
198	383052	5118350	1	-999	77	13
198	383052	5118350	2	-999	177	12
198	383052	5118350	3	-999	270	11
199	384200	5119300	0	-999	-15	13
199	384200	5119300	4	-999	285	2
199	384200	5119300	3	-999	280	11
199	384200	5119300	1	-999	85	13
199	384200	5119300	2	-999	185	12
200	379850	5116910	2	-999	197	12
200	379850	5116910	1	-999	97	13
200	379850	5116910	0	-999	-3	13
200	379850	5116910	3	-999	284	11
200	379850	5116910	4	-999	297	2
201	379590	5116800	4	-999	295	2
201	379590	5116800	3	-999	277	11
201	379590	5116800	2	-999	195	12
201	379590	5116800	1	-999	95	13
201	379590	5116800	0	-999	-5	13
202	379010	5116210	2	-999	209	12
202	379010	5116210	3	-999	293	11
202	379010	5116210	1	-999	109	13
202	379010	5116210	0	-999	9	13
202	379010	5116210	4	-999	309	2
203	380168	5116743	3	-999	307	11

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
203	380168	5116743	2	-999	207	12
203	380168	5116743	1	-999	107	13
203	380168	5116743	0	-999	7	13
204	383890	5116800	2	-999	183	12
204	383890	5116800	4	-999	283	2
204	383890	5116800	1	-999	83	13
204	383890	5116800	3	-999	268	11
204	383890	5116800	0	-999	-17	13
205	383800	5116600	4	-999	292	2
205	383800	5116600	3	-999	274	11
205	383800	5116600	2	-999	192	12
205	383800	5116600	1	-999	92	13
205	383800	5116600	0	-999	-8	13
206	383200	5116200	2	-999	210	12
206	383200	5116200	1	-999	110	13
206	383200	5116200	4	-999	310	2
206	383200	5116200	3	-999	293	11
206	383200	5116200	0	-999	10	13
207	383043	5116066	3	-999	336	11
207	383043	5116066	0	-999	36	13
207	383043	5116066	2	-999	236	12
207	383043	5116066	1	-999	136	13
208	382320	5115220	3	-999	342	11
208	382320	5115220	0	-999	42	13
208	382320	5115220	2	-999	242	12
208	382320	5115220	1	-999	142	13
209	380540	5114451	0	-999	39	13
209	380540	5114451	3	-999	339	11
209	380540	5114451	2	-999	239	12
209	380540	5114451	1	-999	139	13
210	379652	5114130	1	-999	135	13
210	379652	5114130	2	-999	235	12
210	379652	5114130	3	-999	329	11
210	379652	5114130	0	-999	35	13
210	379652	5114130	4	-999	335	2
211	380253	5113885	6	-999	339	7
211	380253	5113885	3	-999	333	11
211	380253	5113885	1	-999	139	13
211	380253	5113885	0	-999	39	13
211	380253	5113885	2	-999	239	12
212	382062	5113081	3	-999	366	11
212	382062	5113081	2	-999	266	12

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
212	382062	5113081	1	-999	166	13
212	382062	5113081	0	-999	66	13
213	384126	5113800	0	-999	10	13
213	384126	5113800	6	-999	310	7
213	384126	5113800	3	-999	304	11
213	384126	5113800	2	-999	210	12
213	384126	5113800	1	-999	110	13
214	382900	5111550	3	-999	323	11
214	382900	5111550	2	-999	235	12
214	382900	5111550	1	-999	135	13
214	382900	5111550	0	-999	35	13
214	382900	5111550	4	-999	335	2
215	381022	5111678	4	-999	364	2
215	381022	5111678	3	-999	356	11
215	381022	5111678	1	-999	164	13
215	381022	5111678	2	-999	264	12
215	381022	5111678	0	-999	64	13
217	383382	5111847	6	-999	335	7
217	383382	5111847	3	-999	329	11
217	383382	5111847	2	-999	235	12
217	383382	5111847	1	-999	135	13
217	383382	5111847	0	-999	35	13
223	369900	5109900	6	-999	183	7
223	369900	5109900	3	-999	163	11
223	369900	5109900	2	-999	83	12
223	369900	5109900	1	-999	-17	13
223	369900	5109900	0	-999	-117	13
224	369900	5110750	3	-999	185	11
224	369900	5110750	0	-999	-107	13
224	369900	5110750	2	-999	93	12
224	369900	5110750	4	-999	193	2
224	369900	5110750	1	-999	-7	13
225	369500	5111000	3	-999	216	11
225	369500	5111000	2	-999	116	12
225	369500	5111000	1	-999	16	13
225	369500	5111000	0	-999	-84	13
226	369100	5110900	0	-999	-87	13
226	369100	5110900	3	-999	213	11
226	369100	5110900	2	-999	113	12
226	369100	5110900	1	-999	13	13
227	370300	5111000	0	-999	-84	13
227	370300	5111000	3	-999	213	11
227	370300	5111000	2	-999	116	12

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
227	370300	5111000	1	-999	16	13
227	370300	5111000	4	-999	216	2
228	371060	5111070	1	-999	-8	13
228	371060	5111070	2	-999	92	12
228	371060	5111070	3	-999	184	11
228	371060	5111070	4	-999	192	2
228	371060	5111070	0	-999	-108	13
229	370838	5110587	0	-999	-115	13
229	370838	5110587	1	-999	-15	13
229	370838	5110587	2	-999	85	12
229	370838	5110587	3	-999	175	11
229	370838	5110587	6	-999	185	7
231	371200	5111850	3	205	204	11
231	371200	5111850	2	205	108	12
231	371200	5111850	1	205	8	13
231	371200	5111850	0	205	-92	13
231	371200	5111850	4	205	208	2
232	371700	5112300	4	-999	215	2
232	371700	5112300	3	-999	209	11
232	371700	5112300	2	-999	115	12
232	371700	5112300	1	-999	15	13
232	371700	5112300	0	-999	-85	13
233	370800	5109979	0	-999	-60	13
233	370800	5109979	3	-999	240	11
233	370800	5109979	1	-999	40	13
233	370800	5109979	2	-999	140	12
234	372100	5110900	3	-999	273	11
234	372100	5110900	2	-999	173	12
234	372100	5110900	1	-999	73	13
234	372100	5110900	0	-999	-27	13
235	374050	5111450	0	-999	2	13
235	374050	5111450	3	-999	302	11
235	374050	5111450	2	-999	202	12
235	374050	5111450	1	-999	102	13
236	372400	5112500	3	-999	208	11
236	372400	5112500	0	-999	-85	13
236	372400	5112500	2	-999	115	12
236	372400	5112500	4	-999	215	2
236	372400	5112500	1	-999	15	13
237	373100	5114700	4	-999	244	2
237	373100	5114700	3	-999	239	11
237	373100	5114700	2	-999	144	12

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
237	373100	5114700	1	-999	44	13
237	373100	5114700	0	-999	-56	13
238	373040	5114090	2	-999	129	12
238	373040	5114090	0	-999	-71	13
238	373040	5114090	3	-999	214	11
238	373040	5114090	1	-999	29	13
238	373040	5114090	4	-999	229	2
239	373100	5112900	2	245	147	12
239	373100	5112900	6	245	247	7
239	373100	5112900	3	245	243	11
239	373100	5112900	1	245	47	13
239	373100	5112900	0	245	-53	13
240	374173	5113984	1	-999	38	13
240	374173	5113984	0	-999	-62	13
240	374173	5113984	2	-999	138	12
240	374173	5113984	3	-999	232	11
240	374173	5113984	4	-999	238	2
241	375370	5112550	2	311	211	12
241	375370	5112550	1	311	111	13
241	375370	5112550	0	311	11	13
241	375370	5112550	3	311	311	11
242	376200	5113300	0	-999	0	13
242	376200	5113300	3	-999	300	11
242	376200	5113300	2	-999	200	12
242	376200	5113300	1	-999	100	13
243	377000	5113900	0	-999	4	13
243	377000	5113900	3	-999	295	11
243	377000	5113900	2	-999	204	12
243	377000	5113900	1	-999	104	13
243	377000	5113900	4	-999	304	2
244	377200	5114200	0	-999	17	13
244	377200	5114200	1	-999	117	13
244	377200	5114200	2	-999	217	12
244	377200	5114200	3	-999	307	11
244	377200	5114200	4	-999	317	2
245	375897	5114703	1	-999	104	13
245	375897	5114703	2	-999	204	12
245	375897	5114703	3	-999	304	11
245	375897	5114703	0	-999	4	13
246	375000	5115900	3	-999	215	11
246	375000	5115900	0	-999	-60	13
246	375000	5115900	2	-999	140	12
246	375000	5115900	4	-999	223	2

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
246	375000	5115900	6	-999	240	7
246	375000	5115900	1	-999	40	13
247	376269	5116923	6	-999	242	7
247	376269	5116923	4	-999	236	2
247	376269	5116923	3	-999	231	11
247	376269	5116923	2	-999	142	12
247	376269	5116923	1	-999	42	13
247	376269	5116923	0	-999	-58	13
248	378600	5114400	2	-999	235	12
248	378600	5114400	1	-999	135	13
248	378600	5114400	3	-999	335	11
248	378600	5114400	0	-999	35	13
249	373392	5116737	0	-999	-56	13
249	373392	5116737	6	-999	244	7
249	373392	5116737	3	-999	238	11
249	373392	5116737	2	-999	144	12
249	373392	5116737	1	-999	44	13
250	374843	5117022	6	-999	243	7
250	374843	5117022	3	-999	237	11
250	374843	5117022	2	-999	143	12
250	374843	5117022	1	-999	43	13
250	374843	5117022	0	-999	-57	13
251	379030	5112040	3	-999	327	11
251	379030	5112040	4	-999	335	2
251	379030	5112040	0	-999	35	13
251	379030	5112040	2	-999	235	12
251	379030	5112040	1	-999	135	13
252	374400	5119100	4	-999	271	2
252	374400	5119100	3	-999	259	11
252	374400	5119100	2	-999	171	12
252	374400	5119100	1	-999	71	13
252	374400	5119100	0	-999	-29	13
253	375239	5119043	1	-999	73	13
253	375239	5119043	2	-999	173	12
253	375239	5119043	3	-999	267	11
253	375239	5119043	0	-999	-27	13
253	375239	5119043	6	-999	273	7
254	375239	5118597	1	-999	63	13
254	375239	5118597	4	-999	263	2
254	375239	5118597	0	-999	-37	13
254	375239	5118597	3	-999	258	11
254	375239	5118597	2	-999	163	12

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
255	375636	5118312	0	-999	-26	13
255	375636	5118312	2	-999	174	12
255	375636	5118312	3	-999	274	11
255	375636	5118312	1	-999	74	13
256	375946	5117766	2	-999	158	12
256	375946	5117766	4	-999	258	2
256	375946	5117766	3	-999	252	11
256	375946	5117766	0	-999	-42	13
256	375946	5117766	1	-999	58	13
257	376393	5117270	6	-999	243	7
257	376393	5117270	2	-999	143	12
257	376393	5117270	1	-999	43	13
257	376393	5117270	0	-999	-57	13
257	376393	5117270	3	-999	230	11
257	376393	5117270	4	-999	235	2
258	377198	5116253	2	-999	174	12
258	377198	5116253	0	-999	-26	13
258	377198	5116253	1	-999	74	13
258	377198	5116253	3	-999	268	11
258	377198	5116253	4	-999	274	2
259	380700	5136100	1	-999	252	13
259	380700	5136100	3	-999	452	11
259	380700	5136100	2	-999	352	12
259	380700	5136100	0	-999	152	13
260	381300	5135300	4	-999	417	2
260	381300	5135300	1	-999	217	13
260	381300	5135300	0	-999	117	13
260	381300	5135300	2	-999	317	12
260	381300	5135300	3	-999	410	11
261	382601	5136661	0	-999	155	13
261	382601	5136661	6	-999	455	7
261	382601	5136661	3	-999	449	11
261	382601	5136661	1	-999	255	13
261	382601	5136661	2	-999	355	12
262	383300	5136200	2	-999	355	12
262	383300	5136200	3	-999	455	11
262	383300	5136200	1	-999	255	13
262	383300	5136200	0	-999	155	13
263	383915	5135109	2	-999	365	12
263	383915	5135109	4	-999	465	2
263	383915	5135109	3	-999	457	11
263	383915	5135109	1	-999	265	13
263	383915	5135109	0	-999	165	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
264	384720	5133710	0	414	116	13
264	384720	5133710	3	414	416	11
264	384720	5133710	1	414	216	13
264	384720	5133710	2	414	316	12
265	383251	5134472	2	-999	342	12
265	383251	5134472	0	-999	142	13
265	383251	5134472	1	-999	242	13
265	383251	5134472	6	-999	442	7
265	383251	5134472	3	-999	438	11
266	383915	5131965	1	-999	166	13
266	383915	5131965	3	-999	354	11
266	383915	5131965	2	-999	266	12
266	383915	5131965	0	-999	66	13
266	383915	5131965	4	-999	366	2
267	383158	5131315	2	-999	264	12
267	383158	5131315	6	-999	364	7
267	383158	5131315	3	-999	358	11
267	383158	5131315	1	-999	164	13
267	383158	5131315	0	-999	64	13
268	379900	5132200	0	-999	127	13
268	379900	5132200	3	-999	427	11
268	379900	5132200	2	-999	327	12
268	379900	5132200	1	-999	227	13
269	378648	5133517	3	-999	399	11
269	378648	5133517	2	-999	311	12
269	378648	5133517	1	-999	211	13
269	378648	5133517	0	-999	111	13
269	378648	5133517	4	-999	411	2
270	377693	5133703	6	-999	396	7
270	377693	5133703	4	-999	389	2
270	377693	5133703	2	-999	296	12
270	377693	5133703	1	-999	196	13
270	377693	5133703	0	-999	96	13
270	377693	5133703	3	-999	385	11
271	376526	5132788	2	-999	338	12
271	376526	5132788	0	-999	138	13
271	376526	5132788	3	-999	438	11
271	376526	5132788	1	-999	238	13
272	380837	5130917	1	-999	146	13
272	380837	5130917	0	-999	46	13
272	380837	5130917	3	-999	334	11
272	380837	5130917	4	-999	346	2

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
272	380837	5130917	2	-999	246	12
273	378821	5130811	6	-999	349	7
273	378821	5130811	1	-999	149	13
273	378821	5130811	0	-999	49	13
273	378821	5130811	3	-999	342	11
273	378821	5130811	2	-999	249	12
274	380479	5130135	0	-999	35	13
274	380479	5130135	6	-999	335	7
274	380479	5130135	3	-999	328	11
274	380479	5130135	2	-999	235	12
274	380479	5130135	1	-999	135	13
275	377490	5129800	2	428	334	12
275	377490	5129800	3	428	429	11
275	377490	5129800	1	428	234	13
275	377490	5129800	0	428	134	13
275	377490	5129800	4	428	434	2
276	375173	5129604	4	-999	466	2
276	375173	5129604	3	-999	456	11
276	375173	5129604	2	-999	366	12
276	375173	5129604	1	-999	266	13
276	375173	5129604	0	-999	166	13
277	373581	5129060	0	-999	193	13
277	373581	5129060	3	-999	493	11
277	373581	5129060	2	-999	393	12
277	373581	5129060	1	-999	293	13
278	379192	5129750	2	-999	293	12
278	379192	5129750	3	-999	393	11
278	379192	5129750	0	-999	93	13
278	379192	5129750	1	-999	193	13
279	375800	5128000	3	-999	466	11
279	375800	5128000	2	-999	366	12
279	375800	5128000	1	-999	266	13
279	375800	5128000	0	-999	166	13
280	376650	5127120	2	-999	326	12
280	376650	5127120	3	-999	420	11
280	376650	5127120	1	-999	226	13
280	376650	5127120	0	-999	126	13
280	376650	5127120	4	-999	426	2
281	374841	5126221	4	-999	379	2
281	374841	5126221	3	-999	373	11
281	374841	5126221	2	-999	279	12
281	374841	5126221	1	-999	179	13
281	374841	5126221	0	-999	79	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
282	374801	5126659	0	-999	97	13
282	374801	5126659	3	-999	397	11
282	374801	5126659	2	-999	297	12
282	374801	5126659	1	-999	197	13
283	375107	5125492	1	-999	196	13
283	375107	5125492	3	-999	396	11
283	375107	5125492	2	-999	296	12
283	374801	5125492	0	-999	96	13
284	375900	5125400	4	-999	366	2
284	375900	5125400	2	-999	266	12
284	375900	5125400	3	-999	359	11
284	375900	5125400	1	-999	166	13
284	375900	5125400	0	-999	66	13
285	375531	5124072	0	-999	60	13
285	375531	5124072	1	-999	160	13
285	375531	5124072	2	-999	260	12
285	375531	5124072	3	-999	360	11
286	376600	5125300	0	-999	54	13
286	376600	5125300	1	-999	154	13
286	376600	5125300	2	-999	254	12
286	376600	5125300	4	-999	354	2
286	376600	5125300	3	-999	348	11
287	377700	5124500	4	-999	340	2
287	377700	5124500	1	-999	140	13
287	377700	5124500	0	-999	40	13
287	377700	5124500	3	-999	334	11
287	377700	5124500	2	-999	240	12
288	378224	5124364	2	-999	249	12
288	378224	5124364	1	-999	149	13
288	378224	5124364	3	-999	349	11
288	378224	5124364	0	-999	49	13
289	377773	5125956	1	-999	136	13
289	377773	5125956	6	-999	336	7
289	377773	5125956	2	-999	236	12
289	377773	5125956	0	-999	36	13
289	377773	5125956	3	-999	330	11
290	377852	5126619	0	-999	65	13
290	377852	5126619	3	-999	365	11
290	377852	5126619	2	-999	265	12
290	377852	5126619	1	-999	165	13
291	376786	5126911	1	-999	226	13
291	376786	5126911	6	-999	426	7

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
291	376786	5126911	2	-999	326	12
291	376786	5126911	3	-999	419	11
291	376786	5126911	0	-999	126	13
292	377700	5127176	0	-999	54	13
292	377700	5127176	1	-999	154	13
292	377700	5127176	4	-999	354	2
292	377700	5127176	2	-999	254	12
292	377700	5127176	3	-999	339	11
293	378967	5127402	6	-999	335	7
293	378967	5127402	3	-999	327	11
293	378967	5127402	1	-999	135	13
293	378967	5127402	2	-999	235	12
293	378967	5127402	0	-999	35	13
294	378861	5125731	3	-999	361	11
294	378861	5125731	0	-999	61	13
294	378861	5125731	2	-999	261	12
294	378861	5125731	1	-999	161	13
295	381102	5126765	0	-999	35	13
295	381102	5126765	1	-999	135	13
295	381102	5126765	2	-999	235	12
295	381102	5126765	3	-999	335	11
296	379700	5124400	2	-999	225	12
296	379700	5124400	3	-999	320	11
296	379700	5124400	1	-999	125	13
296	379700	5124400	0	-999	25	13
296	379700	5124400	4	-999	325	2
297	380107	5124139	0	-999	12	13
297	380107	5124139	3	-999	305	11
297	380107	5124139	2	-999	212	12
297	380107	5124139	1	-999	112	13
297	380107	5124139	6	-999	312	7
298	380400	5123900	0	302	6	13
298	380400	5123900	1	302	106	13
298	380400	5123900	3	302	306	11
298	380400	5123900	2	302	206	12
299	380917	5124537	6	-999	305	7
299	380917	5124537	0	-999	5	13
299	380917	5124537	3	-999	298	11
299	380917	5124537	2	-999	205	12
299	380917	5124537	1	-999	105	13
300	381182	5124802	3	-999	301	11
300	381182	5124802	2	-999	209	12
300	381182	5124802	1	-999	109	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
300	381182	5124802	0	-999	9	13
300	381182	5124802	4	-999	309	2
301	382601	5125850	3	-999	297	11
301	382601	5125850	2	-999	204	12
301	382601	5125850	1	-999	104	13
301	382601	5125850	0	-999	4	13
301	382601	5125850	4	-999	304	2
302	382522	5126407	2	-999	204	12
302	382522	5126407	0	-999	4	13
302	382522	5126407	1	-999	104	13
302	382522	5126407	3	-999	297	11
302	382522	5126407	6	-999	304	7
303	383464	5125784	0	-999	4	13
303	383464	5125784	1	-999	104	13
303	383464	5125784	2	-999	204	12
303	383464	5125784	3	-999	297	11
303	383464	5125784	6	-999	304	7
304	383861	5124300	0	-999	4	13
304	383861	5124300	1	-999	104	13
304	383861	5124300	2	-999	204	12
304	383861	5124300	4	-999	304	2
304	383861	5124300	3	-999	297	11
305	383941	5127548	0	-999	27	13
305	383941	5127548	1	-999	127	13
305	383941	5127548	2	-999	227	12
305	383941	5127548	3	-999	317	11
305	383941	5127548	4	-999	327	2
306	382700	5129900	3	-999	396	11
306	382700	5129900	0	-999	96	13
306	382700	5129900	2	-999	296	12
306	382700	5129900	1	-999	196	13
307	386450	5135320	3	-999	457	11
307	386450	5135320	1	-999	257	13
307	386450	5135320	0	-999	157	13
307	386450	5135320	2	-999	357	12
308	385735	5135425	0	-999	150	13
308	385735	5135425	4	-999	450	2
308	385735	5135425	3	-999	446	11
308	385735	5135425	2	-999	350	12
308	385735	5135425	1	-999	250	13
309	388510	5134494	3	-999	328	11
309	388510	5134494	2	-999	235	12

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
309	388510	5134494	1	-999	135	13
309	388510	5134494	0	-999	35	13
309	388510	5134494	6	-999	335	7
310	387776	5133760	0	-999	35	13
310	387776	5133760	0	-999	335	70
310	387776	5133760	3	-999	328	11
310	387776	5133760	2	-999	235	12
310	387776	5133760	1	-999	135	13
311	385556	5134011	3	-999	403	11
311	385556	5134011	0	-999	109	13
311	385556	5134011	2	-999	309	12
311	385556	5134011	4	-999	409	2
311	385556	5134011	1	-999	209	13
312	384655	5133635	6	-999	414	7
312	384655	5133635	0	-999	114	13
312	384655	5133635	1	-999	214	13
312	384655	5133635	2	-999	314	12
312	384655	5133635	3	-999	407	11
313	386576	5133635	0	-999	95	13
313	386576	5133635	3	-999	395	11
313	386576	5133635	2	-999	295	12
313	386576	5133635	1	-999	195	13
314	385771	5132113	3	-999	357	11
314	385771	5132113	0	-999	57	13
314	385771	5132113	1	-999	157	13
314	385771	5132113	2	-999	257	12
315	387185	5132847	1	-999	135	13
315	387185	5132847	2	-999	235	12
315	387185	5132847	0	-999	35	13
315	387185	5132847	6	-999	335	7
315	387185	5132847	3	-999	327	11
316	384893	5129141	2	-999	265	12
316	384893	5129141	1	-999	165	13
316	384893	5129141	3	-999	365	11
316	384893	5129141	0	-999	65	13
317	385144	5127029	0	-999	7	13
317	385144	5127029	6	-999	307	7
317	385144	5127029	3	-999	299	11
317	385144	5127029	2	-999	207	12
317	385144	5127029	1	-999	107	13
318	385072	5125919	2	-999	204	12
318	385072	5125919	1	-999	104	13
318	385072	5125919	0	-999	4	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
318	385072	5125919	3	-999	296	11
318	385072	5125919	4	-999	304	2
319	386075	5128425	1	-999	133	13
319	386075	5128425	6	-999	333	7
319	386075	5128425	0	-999	33	13
319	386075	5128425	3	-999	324	11
319	386075	5128425	2	-999	233	12
320	386164	5128622	4	-999	334	2
320	386164	5128622	0	-999	34	13
320	386164	5128622	3	-999	326	11
320	386164	5128622	2	-999	234	12
320	386164	5128622	1	-999	134	13
321	386970	5129249	0	-999	36	13
321	386970	5129249	2	-999	236	12
321	386970	5129249	1	-999	136	13
321	386970	5129249	6	-999	336	7
321	386970	5129249	3	-999	328	11
322	388400	5129900	3	-999	360	11
322	388400	5129900	1	-999	170	13
322	388400	5129900	0	-999	70	13
322	388400	5129900	4	-999	370	2
322	388400	5129900	2	-999	270	12
323	389200	5130800	3	385	385	11
323	389200	5130800	0	385	88	13
323	389200	5130800	4	385	388	2
323	389200	5130800	2	385	288	12
323	389200	5130800	1	385	188	13
324	388707	5129750	0	-999	96	13
324	388707	5129750	3	-999	396	11
324	388707	5129750	1	-999	196	13
324	388707	5129750	2	-999	296	12
325	389900	5129500	3	-999	389	11
325	389900	5129500	1	-999	195	13
325	389900	5129500	0	-999	95	13
325	389900	5129500	4	-999	395	2
325	389900	5129500	2	-999	295	12
326	390990	5131230	3	-999	400	11
326	390990	5131230	2	-999	300	12
326	390990	5131230	1	-999	200	13
326	390990	5131230	0	-999	100	13
327	388903	5131558	3	-999	359	11
327	388903	5131558	0	-999	66	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
327	388903	5131558	2	-999	266	12
327	388903	5131558	6	-999	366	7
327	388903	5131558	1	-999	166	13
328	392323	5131200	3	-999	384	11
328	392323	5131200	2	-999	284	12
328	392323	5131200	1	-999	184	13
328	392323	5131200	0	-999	84	13
329	390290	5131900	3	-999	381	11
329	390290	5131900	4	-999	387	2
329	390290	5131900	0	-999	87	13
329	390290	5131900	1	-999	187	13
329	390290	5131900	2	-999	287	12
330	386898	5126563	2	-999	234	12
330	386898	5126563	1	-999	134	13
330	386898	5126563	0	-999	34	13
330	386898	5126563	6	-999	334	7
330	386898	5126563	3	-999	326	11
331	387507	5127673	6	-999	347	7
331	387507	5127673	0	-999	47	13
331	387507	5127673	1	-999	147	13
331	387507	5127673	3	-999	340	11
331	387507	5127673	2	-999	247	12
332	390100	5128090	0	-999	65	13
332	390100	5128090	1	-999	165	13
332	390100	5128090	2	-999	265	12
332	390100	5128090	6	-999	365	7
332	390100	5128090	3	-999	359	11
333	393128	5129660	1	-999	166	13
333	393128	5129660	0	-999	66	13
333	393128	5129660	2	-999	266	12
333	393128	5129660	3	-999	360	11
333	393128	5129660	6	-999	366	7
334	393780	5128370	3	361	350	11
334	393780	5128370	1	361	165	13
334	393780	5128370	2	361	265	12
334	393780	5128370	4	361	365	2
334	393780	5128370	0	361	65	13
335	394100	5127200	1	-999	162	13
335	394100	5127200	2	-999	262	12
335	394100	5127200	3	-999	350	11
335	394100	5127200	4	-999	362	2
335	394100	5127200	0	-999	62	13
336	395563	5128175	3	-999	360	11

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
336	395563	5128175	0	-999	66	13
336	395563	5128175	2	-999	266	12
336	395563	5128175	6	-999	366	7
336	395563	5128175	1	-999	166	13
337	396494	5127369	1	-999	165	13
337	396494	5127369	0	-999	65	13
337	396494	5127369	2	-999	265	12
337	396494	5127369	3	-999	358	11
337	396494	5127369	6	-999	365	7
338	396100	5126900	0	-999	65	13
338	396100	5126900	1	-999	165	13
338	396100	5126900	2	-999	265	12
338	396100	5126900	3	-999	350	11
338	396100	5126900	4	-999	365	2
339	395410	5126500	0	-999	66	13
339	395410	5126500	1	-999	166	13
339	395410	5126500	2	-999	266	12
339	395410	5126500	3	-999	353	11
339	395410	5126500	4	-999	366	2
340	397620	5124310	3	397	399	11
340	397620	5124310	2	397	299	12
340	397620	5124310	0	397	99	13
340	397620	5124310	1	397	199	13
341	396995	5123842	6	-999	389	7
341	396995	5123842	3	-999	382	11
341	396995	5123842	2	-999	289	12
341	396995	5123842	1	-999	189	13
341	396995	5123842	0	-999	89	13
342	396333	5123054	1	-999	171	13
342	396333	5123054	4	-999	371	2
342	396333	5123054	2	-999	271	12
342	396333	5123054	0	-999	71	13
342	396333	5123054	3	-999	361	11
343	394364	5124129	6	-999	360	7
343	394364	5124129	3	-999	353	11
343	394364	5124129	2	-999	260	12
343	394364	5124129	1	-999	160	13
343	394364	5124129	0	-999	60	13
344	391517	5123520	3	-999	329	11
344	391517	5123520	6	-999	336	7
344	391517	5123520	2	-999	236	12
344	391517	5123520	1	-999	136	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
344	391517	5123520	0	-999	36	13
345	391392	5124701	2	-999	264	12
345	391392	5124701	3	-999	364	11
345	391392	5124701	1	-999	164	13
345	391392	5124701	0	-999	64	13
346	391481	5125632	6	-999	357	7
346	391481	5125632	3	-999	350	11
346	391481	5125632	2	-999	257	12
346	391481	5125632	1	-999	157	13
346	391481	5125632	0	-999	57	13
347	391589	5126653	2	-999	259	12
347	391589	5126653	1	-999	159	13
347	391589	5126653	3	-999	349	11
347	391589	5126653	4	-999	359	2
347	391589	5126653	0	-999	59	13
348	390354	5127351	2	-999	265	12
348	390354	5127351	6	-999	365	7
348	390354	5127351	3	-999	358	11
348	390354	5127351	1	-999	165	13
348	390354	5127351	0	-999	65	13
349	388724	5126366	3	-999	365	11
349	388724	5126366	2	-999	265	12
349	388724	5126366	1	-999	165	13
349	388724	5126366	0	-999	65	13
350	387722	5126438	2	-999	247	12
350	387722	5126438	1	-999	147	13
350	387722	5126438	0	-999	47	13
350	387722	5126438	4	-999	347	2
350	387722	5126438	3	-999	339	11
351	387006	5125829	6	-999	333	7
351	387006	5125829	3	-999	326	11
351	387006	5125829	2	-999	233	12
351	387006	5125829	1	-999	133	13
351	387006	5125829	0	-999	33	13
352	386952	5125418	1	-999	132	13
352	386952	5125418	0	-999	32	13
352	386952	5125418	2	-999	232	12
352	386952	5125418	3	-999	324	11
352	386952	5125418	4	-999	332	2
353	387364	5125077	3	-999	324	11
353	387364	5125077	2	-999	231	12
353	387364	5125077	1	-999	131	13
353	387364	5125077	0	-999	31	13

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
353	387364	5125077	6	-999	331	7
354	387100	5124300	4	-999	315	2
354	387100	5124300	3	-999	307	11
354	387100	5124300	2	-999	215	12
354	387100	5124300	0	-999	15	13
354	387100	5124300	1	-999	115	13
355	386300	5123500	0	-999	4	13
355	386300	5123500	6	-999	304	7
355	386300	5123500	3	-999	295	11
355	386300	5123500	1	-999	104	13
355	386300	5123500	2	-999	204	12
356	388850	5123609	0	-999	23	13
356	388850	5123609	4	-999	323	2
356	388850	5123609	3	-999	315	11
356	388850	5123609	2	-999	223	12
356	388850	5123609	1	-999	123	13
357	390192	5125847	2	-999	265	12
357	390192	5125847	1	-999	165	13
357	390192	5125847	0	-999	65	13
357	390192	5125847	3	-999	365	11
358	391106	5125811	1	-999	160	13
358	391106	5125811	6	-999	360	7
358	391106	5125811	0	-999	60	13
358	391106	5125811	2	-999	260	12
358	391106	5125811	3	-999	352	11
359	391213	5124684	0	-999	65	13
359	391213	5124684	3	-999	365	11
359	391213	5124684	2	-999	265	12
359	391213	5124684	1	-999	165	13
360	391302	5123842	1	-999	142	13
360	391302	5123842	2	-999	242	12
360	391302	5123842	0	-999	42	13
360	391302	5123842	6	-999	342	7
360	391302	5123842	3	-999	334	11
361	394095	5123753	1	-999	154	13
361	394095	5123753	0	-999	54	13
361	394095	5123753	6	-999	354	7
361	394095	5123753	3	-999	344	11
361	394095	5123753	2	-999	254	12
362	393308	5123054	4	-999	344	2
362	393308	5123054	3	-999	338	11
362	393308	5123054	2	-999	244	12

ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
362	393308	5123054	1	-999	144	13
362	393308	5123054	0	-999	44	13
363	397568	5123090	3	-999	389	11
363	397568	5123090	4	-999	397	2
363	397568	5123090	0	-999	97	13
363	397568	5123090	2	-999	297	12
363	397568	5123090	1	-999	197	13
364	399520	5122983	3	-999	429	11
364	399520	5122983	2	-999	329	12
364	399520	5122983	1	-999	229	13
364	399520	5122983	0	-999	129	13
365	377900	5114900	4	328	331	2
365	377900	5114900	0	328	31	13
365	377900	5114900	3	328	327	11
365	377900	5114900	2	328	231	12
365	377900	5114900	1	328	131	13
366	381250	5118310	4	301	303	2
366	381250	5118310	2	301	203	12
366	381250	5118310	1	301	103	13
366	381250	5118310	0	301	3	13
366	381250	5118310	3	301	295	11
367	390290	5130610	3	399	403	11
367	390290	5130610	2	399	303	12
367	390290	5130610	1	399	203	13
367	390290	5130610	0	399	103	13
368	389800	5135900	4	342	344	2
368	389800	5135900	0	342	44	13
368	389800	5135900	1	342	144	13
368	389800	5135900	3	342	332	11
368	389800	5135900	2	342	244	12
369	387250	5113950	6	-999	335	7
369	387250	5113950	3	-999	330	11
369	387250	5113950	2	-999	235	12
369	387250	5113950	1	-999	135	13
369	387250	5113950	0	-999	35	13
370	389577	5114437	2	-999	282	12
370	389577	5114437	3	-999	375	11
370	389577	5114437	1	-999	182	13
370	389577	5114437	0	-999	82	13
370	389577	5114437	4	-999	382	2
371	391081	5113856	3	-999	389	11
371	391081	5113856	2	-999	295	12
371	391081	5113856	1	-999	195	13

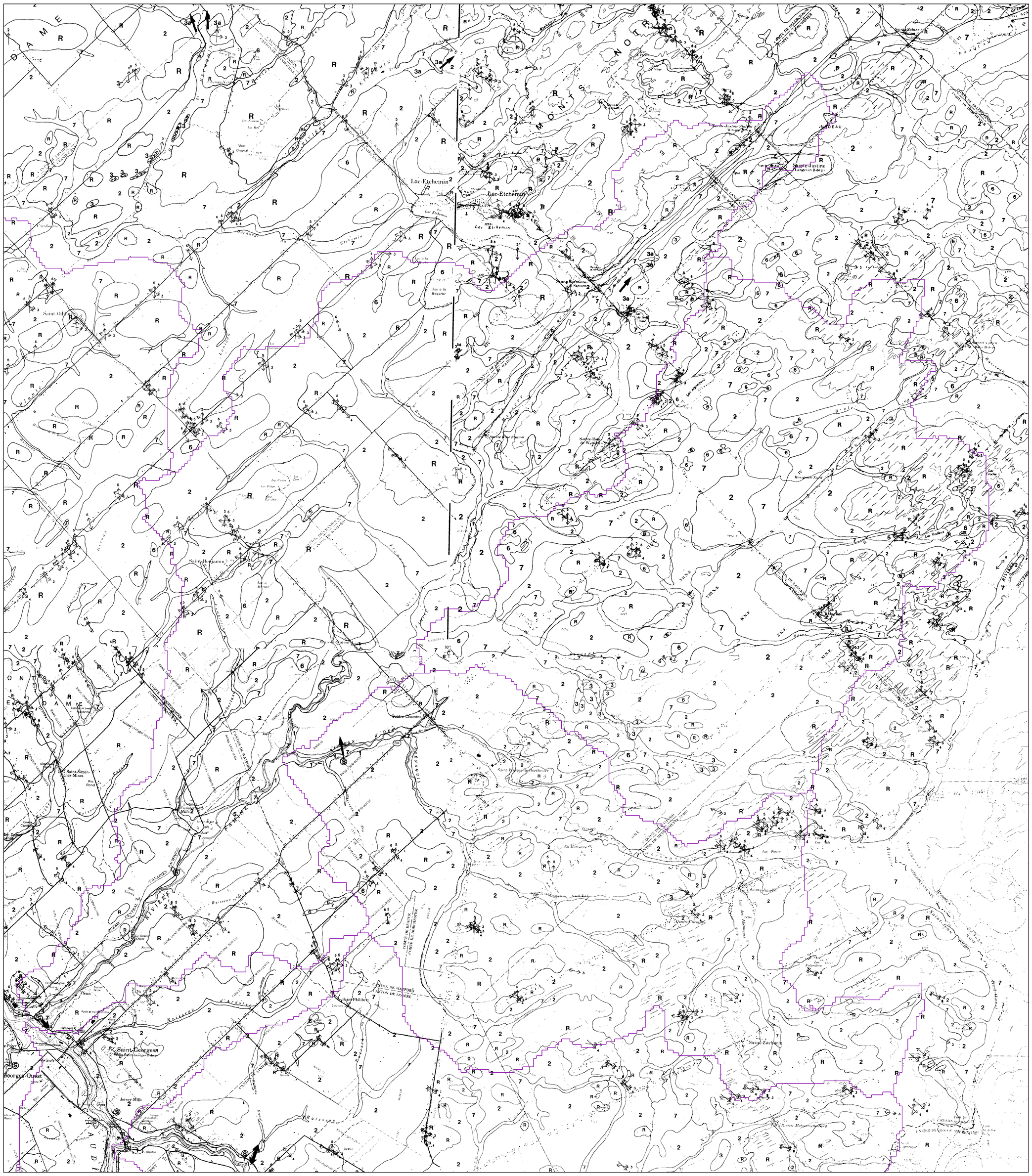
ID	EST	NORD	ID_Couche	Niveau_Eau	Epaisseur	Code_Matieure
371	391081	5113856	0	-999	95	13
371	391081	5113856	6	-999	395	7
372	388446	5112756	0	-999	67	13
372	388446	5112756	6	-999	367	7
372	388446	5112756	3	-999	361	11
372	388446	5112756	2	-999	267	12
372	388446	5112756	1	-999	167	13
373	386717	5111318	0	-999	96	13
373	386717	5111318	1	-999	196	13
373	386717	5111318	3	-999	396	11
373	386717	5111318	2	-999	296	12
374	390658	5122209	6	-999	330	7
374	390658	5122209	3	-999	324	11
374	390658	5122209	2	-999	230	12
374	390658	5122209	1	-999	130	13
374	390658	5122209	0	-999	30	13

ID	Est	Nord	Niveau_eau	IDCouche	Epaisseur	CodeMatiere
375	5112800	375750	-1	1	-200	13
375	5112800	375750	-1	0	-300	13
375	5112800	375750	-1	2	-100	12
375	5112800	375750	-1	3	0	11
376	5113100	376100	-3,6	1	-200	13
376	5113100	376100	-3,6	3	0	11
376	5113100	376100	-3,6	2	-100	12
376	5113100	376100	-3,6	0	-300	13
377	5113800	376850	-3,1	1	-200	13
377	5113800	376850	-3,1	0	-300	13
377	5113800	376850	-3,1	3	0	11
377	5113800	376850	-3,1	2	-100	12
378	5114100	377075	-1,9	4	0	2
378	5114100	377075	-1,9	3	-10	11
378	5114100	377075	-1,9	2	-100	12
378	5114100	377075	-1,9	1	-200	13
378	5114100	377075	-1,9	0	-300	13
379	5114150	377150	-0,6	4	0	2
379	5114150	377150	-0,6	3	-10	11

ID	Est	Nord	Niveau_eau	IDCouche	Epaisseur	CodeMatiere
379	5114150	377150	-0,6	2	-100	12
379	5114150	377150	-0,6	1	-200	13
379	5114150	377150	-0,6	0	-300	13
380	5114150	377250	-3,3	4	0	2
380	5114150	377250	-3,3	3	-10	11
380	5114150	377250	-3,3	2	-100	12
380	5114150	377250	-3,3	1	-200	13
380	5114150	377250	-3,3	0	-300	13
381	5114200	377400	-1,3	1	-200	13
381	5114200	377400	-1,3	2	-100	12
381	5114200	377400	-1,3	0	-300	13
381	5114200	377400	-1,3	3	-10	11
381	5114200	377400	-1,3	4	0	2
382	5114400	377400	-1,1	1	-200	13
382	5114400	377400	-1,1	0	-300	13
382	5114400	377400	-1,1	4	0	2
382	5114400	377400	-1,1	2	-100	12
382	5114400	377400	-1,1	3	-10	11
383	5114550	377600	-1,2	1	-200	13
383	5114550	377600	-1,2	2	-100	12
383	5114550	377600	-1,2	4	0	2
383	5114550	377600	-1,2	3	-10	11
383	5114550	377600	-1,2	0	-300	13
384	5114400	377600	-2,7	2	-100	12
384	5114400	377600	-2,7	3	-10	11
384	5114400	377600	-2,7	1	-200	13
384	5114400	377600	-2,7	0	-300	13
384	5114400	377600	-2,7	4	0	2
385	5115300	378300	-0,5	2	-100	12
385	5115300	378300	-0,5	4	0	2
385	5115300	378300	-0,5	3	-10	11
385	5115300	378300	-0,5	0	-300	13
385	5115300	378300	-0,5	1	-200	13
386	5115750	378500	-2,9	2	-100	12
386	5115750	378500	-2,9	4	0	2
386	5115750	378500	-2,9	0	-300	13
386	5115750	378500	-2,9	1	-200	13
386	5115750	378500	-2,9	3	-10	11
387	5116050	378650	-1,1	0	-300	13
387	5116050	378650	-1,1	1	-200	13
387	5116050	378650	-1,1	2	-100	12
387	5116050	378650	-1,1	4	0	2
387	5116050	378650	-1,1	3	-8	11

ID	Est	Nord	Niveau_eau	IDCouche	Epaisseur	CodeMatiere
388	5118100	381300	-10,4	4	0	2
388	5118100	381300	-10,4	1	-200	13
388	5118100	381300	-10,4	3	-8	11
388	5118100	381300	-10,4	2	-100	12
388	5118100	381300	-10,4	0	-300	13
389	5119100	382200	-3,5	0	-300	13
389	5119100	382200	-3,5	4	0	2
389	5119100	382200	-3,5	2	-100	12
389	5119100	382200	-3,5	1	-200	13
389	5119100	382200	-3,5	3	-8	11
390	5123600	387200	-2,3	4	0	2
390	5123600	387200	-2,3	1	-200	13
390	5123600	387200	-2,3	2	-100	12
390	5123600	387200	-2,3	3	-8	11
390	5123600	387200	-2,3	0	-300	13
391	5124100	387650	-2,3	3	-8	11
391	5124100	387650	-2,3	4	0	2
391	5124100	387650	-2,3	1	-200	13
391	5124100	387650	-2,3	0	-300	13
391	5124100	387650	-2,3	2	-100	12
392	5126100	389850	-1,8	2	-100	12
392	5126100	389850	-1,8	1	-200	13
392	5126100	389850	-1,8	3	0	11
392	5126100	389850	-1,8	0	-300	13
393	5126050	389900	-1	3	0	11
393	5126050	389900	-1	2	-100	12
393	5126050	389900	-1	0	-300	13
393	5126050	389900	-1	1	-200	13
394	5124400	397700	-2,7	0	-300	13
394	5124400	397700	-2,7	2	-100	12
394	5124400	397700	-2,7	1	-200	13
394	5124400	397700	-2,7	3	0	11
395	5125100	396900	-7,2	6	0	7
395	5125100	396900	-7,2	0	-300	13
395	5125100	396900	-7,2	1	-200	13
395	5125100	396900	-7,2	2	-100	12
395	5125100	396900	-7,2	3	-7	11
396	5126750	395200	-1,2	3	-7	11
396	5126750	395200	-1,2	0	-300	13
396	5126750	395200	-1,2	1	-200	13
396	5126750	395200	-1,2	6	0	7
396	5126750	395200	-1,2	2	-100	12

ID	Est	Nord	Niveau_eau	IDCouche	Epaisseur	CodeMatiere
397	5127600	394350	-1	2	-100	12
397	5127600	394350	-1	1	-200	13
397	5127600	394350	-1	0	-300	13
397	5127600	394350	-1	4	0	2
397	5127600	394350	-1	3	-11	11
398	5128600	393450	0	1	-200	13
398	5128600	393450	0	4	0	2
398	5128600	393450	0	3	-10	11
398	5128600	393450	0	0	-300	13
398	5128600	393450	0	2	-100	12
399	5131150	390950	-1,8	1	-200	13
399	5131150	390950	-1,8	0	-300	13
399	5131150	390950	-1,8	3	0	11
399	5131150	390950	-1,8	2	-100	12
400	5133450	388900	-1,2	1	-200	13
400	5133450	388900	-1,2	0	-300	13
400	5133450	388900	-1,2	2	-100	12
400	5133450	388900	-1,2	3	0	11
401	5133800	388500	-2,1	0	-300	13
401	5133800	388500	-2,1	2	-100	12
401	5133800	388500	-2,1	3	-7	11
401	5133800	388500	-2,1	4	0	2
401	5133800	388500	-2,1	1	-200	13
402	5134400	387150	-2,2	2	-100	12
402	5134400	387150	-2,2	1	-200	13
402	5134400	387150	-2,2	3	-7	11
402	5134400	387150	-2,2	4	0	2
402	5134400	387150	-2,2	0	-300	13
403	5134750	387400	-1,5	3	0	11
403	5134750	387400	-1,5	2	-100	12
403	5134750	387400	-1,5	1	-200	13
403	5134750	387400	-1,5	0	-300	13


Lac-Etchemin
Saint-Odilon
Saint-Benjamin
Saint-Simon-les-Mines
Saint-Georges
Saint-Georges-Ouest
Jersey Mills
Saint-Philibert
Saint-Zacharie
Sainte-Aurélie
Saint-Prosper-de-Dorchester
Sainte-Justine
Sainte-Sabine-Station
Sainte-Rose-de-Watford
Sainte-Hénédine-Station
Sainte-Aurélie-Station
Saint-Georges-Station
Lac Etchemin
Lac à la Roquette
Lac Vallières
Lac Fortin
Lac Fillion
Lac Cross
Lac Bégin
Lac Bolduc
Lac Bilodeau
Lac Bélanger
Lac Bas
Mont Original
Petit Rang
Rang Saint-Joseph
Rang Saint-Jean
Rang Saint-Louis
Rang Saint-Georges
Rang Saint-Simon
Rang Saint-Antoine
Rang Saint-Pierre
Rang Saint-Gabriel
Rang Saint-Paul
Rang Saint-Thomas
Rang Saint-Isidore
Rang Saint-Nicolas
Rang Saint-Augustin
Rang Saint-Charles
Rang Saint-Alexis
Rang Saint-Alphonse
Rang Saint-Edouard
Rang Saint-Etienne
Rang Saint-Gilbert
Rang Saint-Hubert
Rang Saint-Jacques
Rang Saint-Joachim
Rang Saint-Jules
Rang Saint-Laurent
Rang Saint-Marc
Rang Saint-Martin
Rang Saint-Michel
Rang Saint-Nazaire
Rang Saint-Noël
Rang Saint-Olivier
Rang Saint-Patrice
Rang Saint-Paulin
Rang Saint-Philippe
Rang Saint-Pierre-Baptiste
Rang Saint-Pierre-Nord
Rang Saint-Pierre-Sud
Rang Saint-Raphaël
Rang Saint-Romain
Rang Saint-Sébastien
Rang Saint-Théophile
Rang Saint-Thomas-Nord
Rang Saint-Thomas-Sud
Rang Saint-Victor
Rang Sainte-Anne
Rang Sainte-Catherine
Rang Sainte-Cécile
Rang Sainte-Claire
Rang Sainte-Elisabeth
Rang Sainte-Geneviève
Rang Sainte-Marguerite
Rang Sainte-Marie
Rang Sainte-Thérèse
Rang Sainte-Ursule
Rang Sainte-Victoire
Rang Sainte-Virginie
Rang Sainte-Yvonne
Rang Sainte-Zoé
Rang Sainte-Zénaïde
Rang Sainte-Zéphirine
Rang Sainte-Zéphirine-Nord
Rang Sainte-Zéphirine-Sud
Rang Sainte-Zéphirine-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Centre-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Nord-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Est-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Est-Ouest-Ouest-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Est-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Est-Ouest
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest-Est
Rang Sainte-Zéphirine-Sud-Est-Ouest-Est-Ouest-Est-Ouest-Ouest
R